

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**



# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2001**

**Petr Batelka**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**Katedra energetických zařízení**



**PETR BATELKA**

**Vizualizace smykových oblastí v kouřovém tunelu**  
(Visualisation of Shearing Areas in a Smoke Tunnel)

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Jiří Unger, Csc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Richard Zakopal

Rozsah práce:

Počet stran: 65

Počet obrázků: 77

Počet tabulek: 2

Počet grafů: 6

Počet příloh: 8

Liberec 2001



## **Anotace:**

Bakalářská práce se zabývá vizualizací smykových oblastí, získávání obrazu a následné vyhodnocení proudového pole v kouřovém tunelu. Podává informace o postupu modelování fyzikálního pole, popis a použití jednotlivých optických metod vhodných pro vizualizaci proudění plynů, které znázorňují toto rozložené fyzikální pole a jeho změny. Je zde také provedena optimalizace funkčních vlastností kouřového tunelu včetně generátoru částic.

## **Annotation:**

The Final Year Project deals with a visualisation of shearing areas while obtaining a picture and consequent result of stream field in a smoke tunnel. Information on modelling of a physical field and description of particular optical methods suitable for a gas flow visualisation are delivered. Physical field with its changes is described this way. Optimization of a functional properties is done in both the smoke tunnel and generator of particles.

## **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 20.5.2001

.....

Petr Batelka

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

20.5.2001

Petr Batelka

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval Doc. Ing. Jiřímu Ungerovi, Csc. za odborné vedení bakalářské práce a za cenné připomínky, náměty a rady k její obsahové stránce. Poděkování také patří Ing. Richardu Zakopalovi za poskytnutí cenných informací, p. Petru Jerjemu za jeho spolupráci a praktické rady v experimentálním měření, p. Jaroslavu Kneřovi při zpracování fotografických snímků a Ing. Alešovi Cvrkalovi za natočení vizualizovaného proudění rychlokamerou.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě po dobu studia obohacovali svými znalostmi a zkušenostmi.

Petr Batelka

# OBSAH

Přehled hlavních označení .....	8
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
1.1 K čemu je práce určena a její cíle .....	9
1.2 Popis jednotlivých kapitol .....	9
<b>2 FYZIKÁLNÍ POLE .....</b>	<b>10</b>
2.1 Modelování fyzikálních polí .....	10
<b>3 ZOBRAZOVÁNÍ OPTICKÝMI METODAMI .....</b>	<b>12</b>
3.1 Základy teorie zobrazování .....	12
3.2 Metody vhodné pro vizualizaci proudění plynů .....	14
3.2.1 Stínová metoda .....	15
3.2.2 Clonkové šlírové metody .....	17
3.2.3 Interferometrické metody .....	18
3.2.4 Metoda fázového kontrastu .....	21
3.2.5 Metody využívající zeslabení elektromagnetického nebo korpuskulárního záření při průchodu proudícím plynem .....	22
3.3 Metoda PIV .....	24
<b>4 KOUŘOVÝ TUNEL .....</b>	<b>27</b>
4.1 Popis a princip kouřového tunelu .....	27
4.2 Generátor kouře .....	27
4.3 Fotografie tunelu a použitých modelů .....	28
<b>5 VIZUALIZACE SMYKOVÝCH OBLASTÍ V KOUŘ. TUNELU .....</b>	<b>31</b>
5.1 Prostředky pro zvýšení vztlaku .....	31
5.2 Jednoduchá klapka .....	32
5.3 Odklápěcí klapka .....	35
5.4 Odklopná aerodynamická brzda .....	37
5.5 Spoiler příčného řízení .....	39
5.6 Výsuvný slot na náběžně hraně .....	41
5.7 Symetrický profil křídla .....	44
5.8 Profil tvaru "polovina dutého válce" .....	45
5.9 Válec .....	50
5.10 Profil tvaru "U" .....	51
5.11 Deska .....	52
<b>6 DIGITÁLNÍ SYSTÉM SPEEDCAM+500 .....</b>	<b>53</b>
6.1 Použití rychlostní kamery pro analýzu obrazu a pohybu .....	53
6.1.1 Struktura a funkce digitálního systému speedcam+500 .....	53
6.1.2 Program pro obsluhu sestavy speedcam+500 .....	55
6.1.3 Program pro analýzu pohybu objektu .....	55
6.2 Aplikace speedcam+500 na proudové pole v kouřovém tunelu .....	56

<b>7 OPTIMALIZACE KOUŘOVÉHO TUNELU .....</b>	<b>58</b>
7.1 Úprava napájení topné spirály .....	58
7.2 Odvod kouře .....	58
7.3 Generátor kouře .....	59
7.3.1 Generátor kouře SPTechnics .....	59
7.3.2 Generátor kouře SAFEX .....	61
<b>8 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>64</b>
<b>9 LITERATURA .....</b>	<b>65</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>66</b>
Příloha I	
Příloha II	
Příloha III	
Příloha IV	
Příloha V	
Příloha VI	
Příloha VII	
Příloha VIII	

Záznam z rychlokamery je přiložen na CD nosiči včetně BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## Přehled hlavních označení

Označení	Jednotka	Veličina
$c$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost šíření světla ve vakuu
$v$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost šíření světla v látkovém prostředí
$n$	$[1]$	index lomu světla
$\alpha_1$	$[rad]$	úhel odrazu
$\alpha_2$	$[rad]$	úhel dopadu
$\varepsilon$	$[^\circ]$	odchylka
$t$	$[s]$	čas
$l$	$[m]$	délka
$\lambda$	$[m]$	vlnová délka
$e$	$[eV]$	energie elektronu
$\mu$	$[m^2 \cdot kg^{-1}]$	hmotový součinitel zeslabení
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
$T_0$	$[^\circ C]$	teplota
$\varphi$	$[\%]$	relativní vlhkost
$p_0$	$[Pa]$	tlak okolí, počáteční tlak
$P$	$[W]$	výkon
$U$	$[V]$	elektrické napětí
$I$	$[A]$	elektrický proud
$f$	$[Hz]$	frekvence
$Ma$	$[1]$	Machovo číslo
$Re$	$[1]$	Reynoldsovo číslo
$Re_{krit}$	$[1]$	kritické Reynoldsovo číslo
$c_y$	$[1]$	součinitel vztlaku
$c_x$	$[1]$	součinitel odporu
$\alpha$	$[^\circ]$	úhel náběhu
$\alpha_{krit}$	$[^\circ]$	kritický úhel náběhu

# 1 ÚVOD

## 1.1 K čemu je práce určena a její cíle

Vizualizace proudění je velmi potřebnou pomůckou experimentální mechaniky tekutin a stala se v poslední době nezbytnou součástí při studiu složitých případů proudění.

Práce je určena k získání širších poznatků proudění kolem obtékaných modelů, získání nových podkladů pro konstrukci (např. nových strojů). Přináší ucelenější seznámení s optickými metodami, které jsou vhodné pro vizualizaci proudění plynů. Práci lze i pochopitelně využít při výuce, zvláště pak při názorném seznamování studentů se základními obrazci při obtékání těles.

Cílem celé práce je provést vizualizaci smykových oblastí, následný popis jevů na vybraných modelech v kouřovém tunelu. Dále pak popis optických metod vhodných pro vizualizaci proudění plynů. Je nutné provést optimalizaci funkčních vlastností tunelu a navrhnout vhodnější generátor částic.

## 1.2 Popis jednotlivých kapitol

Tato kapitola by měla čtenáři poskytnout lepší orientaci v této bakalářské práci při hledání konkrétní informace.

Následující kapitola definuje fyzikální pole a ukazuje postup při řešení úlohy matematickým modelováním. Postup je zahrnut od obecné formulace problému, až po analýzu se srovnávacím experimentem.

Charakteristikou třetí kapitoly je popis metod vhodných pro vizualizaci proudění plynů. Vždy je nejdříve uveden stručný výklad principu metody, poté rozbor její fyzikální podstaty, dále požadavky a informace na sestavení potřebného zařízení a její stručné zhodnocení.

Čtvrtá kapitola popisuje jednotlivé části a funkci kouřového tunelu ve kterém byly provedeny vizualizační experimenty. Jsou zde také pořízeny záběry z digitálního fotoaparátu, zejména tunelu a modelů na kterých se provádělo obtékání.

Pátá kapitola obsahuje fotografie pořízené v tunelu. Jedná se o vizualizaci smykových oblastí a následné vyhodnocení jevů na obtékaných modelech, zejména profilů křídel letadel.

V šesté kapitole je popsána rychlostní kamera SPEEDCAM+500 pro analýzu obrazu a pohybu, která byla využita k zachycení nestacionárního pole kolem obtékaných modelů. Zde jsou obsaženy informace pro obsluhu a programové vybavení celé sestavy SPEEDCAM+500 a v poslední řadě konkrétní hodnoty, které byly použity pro získání obrazu z kouřového tunelu.

Sedmá kapitola řeší optimalizaci tunelu jako je zabránění přehřátí topného tělesa a odvod kouře z tunelu. Jako nezbytnou část zde tvoří popis výměny dosavadního generátoru kouře za moderní. Jednotlivé generátory jsou popsány včetně technických informací.

Poslední kapitola podává závěrečné zhodnocení a popisuje použití celé práce.



## 2 FYZIKÁLNÍ POLE

Pojem fyzikální pole představuje část prostoru ve kterém se vyskytuje určitá fyzikální vlastnost, kterou chceme prostudovat. V daném prostoru se může objevit elektrická vodivost nebo magnetický tok nebo změny mechanické, proudění, popř. změny tepelné. V žádném případě není vyloučené záření, např. radioaktivní. Fyzikálním polem je tedy pro nás jen ta část prostoru, v níž je pozorovaná fyzikální vlastnost měřitelná metodou, která je pro daný případ vhodná. Zkoumání fyzikálního pole vyžaduje, abychom mohli v části prostoru popsat vektorové rozložení fyzikální veličiny, co do velikosti a působení směru. Získaný popis pole můžeme předat k dalšímu zpracování do počítače.

### 2.1 Modelování fyzikálních polí

Optickým znázorňováním fyzikálních polí jsme často omezeni rozměry optické soustavy, kterou k danému účelu použijeme. Pro posouzení fyzikálního pole i v soustavách značných rozměrů musíme být schopni modelovat fyzikální pole v jiném měřítku, než má originální dílo.

Model, který k tomuto účelu použijeme musí mít stejné prostorové nebo plošné rozložení a vlastnosti. Snahou je vytvořit jednoduchý a levný model. Plně dostačující je, když model bude odpovídat dílu jen v té fyzikální veličině, o kterou se zajímáme. Prostorové rozložení zkoumaného pole u modelu můžeme často nahradit plošným rozložením, jestliže pole znázorňujeme jen plošně a ne prostorově.

Matematickým modelováním nazýváme celý postup vedoucí, při řešení konkrétní úlohy, až ke konečnému analytickému nebo numerickému řešení. Tento postup má obsahovat několik kroků:

- a) Formulaci problému, kde se jedná o vytvoření vhodného a co nejúplnějšího popisu fyzikálního modelu řešeného jevu.

Popis musí obsahovat:

- fyzikální formulaci počátečních a okrajových podmínek
- omezení geometrická, konstrukční, technologická, apod. Příkladem může být geometrické omezení např. pro Prandtlovy rovnice mezní vrstvy blízkost náběžné hrany, velké příčné nebo podélné zakřivení povrchu, apod.
- vymezení aproximace, které lze z fyzikálního hlediska provést (např. zanedbávání vazkosti, tubulence, apod.)
- jednoznačné definování tekutiny, a to jak z termodynamického hlediska (vhodnou volbou stavové rovnice), tak i z materiálového hlediska (vhodnou volbou

konstitučních vztahů, definujících např. transportní vlastnosti tekutiny).

- vymezení rozsahu použitelnosti a platnosti všech výše uvedených vztahů (vymezením rozsahu platnosti vztahů, použitých ve fyzikálním modelu je bezpodmínečná nutnost, neboť se tím vymezuje rozsah použitelnosti výsledků).

Odchytky výsledku řešení od skutečnosti mají nejčastěji svůj původ právě v nevhodné volbě fyzikálního modelu.

- b) Sestavení úplné soustavy rovnic pro počáteční, příp. okrajovou úlohu včetně počátečních a okrajových podmínek, které popisuje zvolený fyzikální model, tj. sestavení matematického modelu řešeného jevu.

V aerodynamických úlohách se považuje za výchozí rovnice soustava základních zákonů zachování hmoty, hybnosti, někdy ještě momentu hybnosti a energie. Doporučuje se s touto soustavou začít vždy, i když pro některé případy ji lze zjednodušit.

Soustava těchto základních zákonů zachování obsahuje více neznámých, proto je nutno ji doplnit rovnicemi, charakterizující danou tekutinu. Jedná se o materiálové vztahy, popř. charakter pohybu tekutiny (laminární, turbulentní). V řadě případů lze potřebné vztahy získat např. z kinetické teorie plynů.

Matematický model se sestavuje vždy s ohledem na způsob řešení (analytické, numerické). Proto se tedy často zavádí různé matematické aproximace. Tyto matematické aproximace nesmí být v rozporu se zvoleným fyzikálním modelem, tj. matematické zjednodušení výchozích rovnic musí vyhovovat předpokladům zvoleného fyzikálního modelu.

- c) Řešení okrajové či počáteční úlohy (analytické nebo numerické) pro výchozí soustavu rovnic matematického modelu.
- d) Analýza výsledků řešení matematického modelu, případné porovnání se skutečností (experimentem, apod.) a interpretace získaného řešení.

Přístup k matematickému modelování se výrazně změnil zavedením počítačů. Jeho omezení již není v možnostech analytického řešení, ale v kapacitě hardwaru počítače a v nedostatečných znalostech fyzikální podstaty jevů a možnostech jejich popisu.

## 3 ZOBRAZOVÁNÍ OPTICKÝMI METODAMI

### 3.1 Základy teorie zobrazování

Princip zobrazování fyzikálních polí optickými metodami je založen na geometrické i vlnové optice a na jevech, kterými ovlivňují fyzikální pole šíření světla, zejména jeho odraz, lom, dvojlom a polarizace. Základem geometrické optiky jsou čtyři zákony:

a) zákon přímočarého šíření světla

Světlo se šíří ve stejnorodých prostředích přímočaře - odtud představa světelného paprsku, přímky, v níž se světlo šíří. Obecně je pak paprsek definován jako kolmice k vlnoploše.

b) zákon o vzájemné nezávislosti paprsků

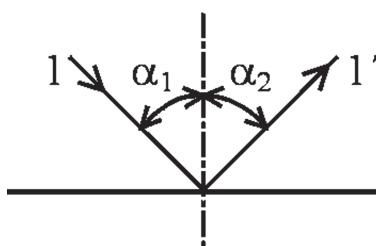
Vyjadřuje, že paprsek světla se šíří prostředím nezávisle na ostatních paprscích ostatních zdrojů (tzn., že světelné paprsky na sebe navzájem nepůsobí). K určitému ovlivnění může dojít jen při interferenci, která však již spadá do vlnové optiky.

c) zákon odrazu

Pro odraz světla (obr. 3.1) platí dva zákony, které plynou z Huygensova principu:

1. úhel dopadu a úhel odrazu leží v jedné rovině, 2. úhel dopadu se rovná úhlu odrazu

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

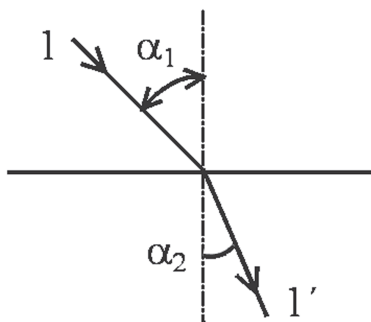


**Obr. 3.1** Odraz světla

d) zákon lomu

Pro lom světla (obr. 3.2) platí dva zákony. Úhel dopadu a úhel lomu leží v jedné rovině. Druhý zákon je tzv. Snellův zákon: poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je pro dané rozhraní dvou izotropních prostředí konstantní a rovná se poměru rychlosti světla v prvním a druhém prostředí. Konstanta je pro dané rozhraní a světlo dané vlnové délky charakteristická a nazývá se relativním indexem lomu, značí se  $n$ . Podle Snellova zákona pak platí:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12} \quad (1)$$



Obr. 3.2 Lom světla

Index  $12$  u relativního indexu lomu znamená, že jde o index lomu z prostředí  $1$  do prostředí  $2$ . Tedy index lomu pro dané rozhraní se rovná poměru rychlosti světla v prostředí, odkud paprsek přichází  $v_1$  k rychlosti světla v prostředí, do něhož se láme  $v_2$ .

Absolutní index lomu  $n$  nějakého prostředí je definován rychlostí  $c$  světla ve vakuu k rychlosti  $v$  světla v uvažovaném prostředí

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Pro dvě optická prostředí o absolutních indexech lomu  $n_1$  a  $n_2$  plyne relativní index lomu z následujícího vztahu.

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Absolutní index lomu je současně mírou optické hustoty prostředí, neboť ze dvou prostředí je to prostředí opticky hustší, jehož absolutní index je větší.

Index lomu světla také závisí na dalších fyzikálních vlastnostech prostředí, jako je teplota, tlak, vlhkost. Z toho je patrné, že paprsek světla procházející tímto prostředím nebude přímočarý, nýbrž křivočarý.

Na tomto poznatku jsou založeny optické metody zobrazení změn indexu lomu vlivem fyzikálních polí.

Ve vlnové optice nás především zajímá jev jako je interference. V prostoru v němž dochází k interferenci (prostor, kde se obě vlnění překrývají) nastává maximální zesílení vlnění. Amplituda kmitů je maximální v místech, do nichž přicházejí obě vlnění ve stejné fázi. V místech do nichž přicházejí obě vlnění právě v opačné fázi, nastává maximální zeslabení vlnění a amplituda kmitů je v nich minimální. Rozdíl optické dráhy pro prošlé světlo je vyjádřeno vztahy:

$$\Delta = k \cdot \lambda, \quad (4)$$

kde  $k=0, 1, 2, 3, \dots$ , dojde k maximálnímu zesílení (stejná fáze), pokud

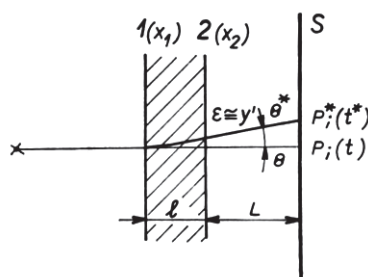
$$\Delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

kde  $k=0, 1, 2, 3, \dots$ , dojde k maximálnímu zeslabení (opačná fáze).

### 3.2 Metody vhodné pro vizualizaci proudění plynů

Použití metod pro vizualizaci proudění nám může poskytnout kvantitativní údaje a hodí se právě pro studium proudění. Vlastnost, bez níž by použití těchto metod nebylo možné, je stlačitelnost plynů. Využívá se při nich totiž změn indexu lomu proudícího plynu, vyvolaných změn tlaku a tím i hustoty, po případě i teploty. Tyto změny indexu lomu jsou prostým okem většinou nezachytitelné, používá se pro jejich vizualizaci různých optických zařízení a z toho vyplývajících metod.

Při všech metodách, které budou popsány níže se informace o proudění získávají v podstatě z místních změn osvětlení zorného pole pozorovacího zařízení, například ze změn proti stavu, kdy je prostředí v klidu. Sledujeme-li paprsek procházející zkoumanou vrstvou plynu (obr. 3.3), zjistíme, že bude-li vrstva homogenní, dopadne paprsek na stínítko  $S$  v místě  $P$ , a to v okamžiku  $t$  a ve směru  $\Theta$  (charakterizovanými například příslušnými směrovými kosiny). Kdežto, budou-li ve vrstvě nehomogenity, dopadne paprsek v nějakém místě  $P^*$ , a to v okamžiku  $t^*$  a ve směru  $\Theta^*$ , což má za následek místní změnu osvětlení stínítka. Pomocí optických zařízení lze potom získat na snímku, buď záznam fázového posuvu odpovídajícího časového rozdílu  $\tau = t^* - t$  (metody interferometrické), nebo záznam odchylky  $\varepsilon = \Theta^* - \Theta$  (clonkové šlírové metody), nebo záznam posunutí stopy  $\Delta P = \overline{P^*P}$  (stínová metoda), popřípadě kombinaci těchto záznamů. Ze záznamů je pak nutno nalézt odpovídající  $\tau$ ,  $\varepsilon$  a  $\Delta P$  a z nich dále místní hodnoty absolutního indexu lomu  $n = n(x, y, z)$  objektu, kterým paprsky procházely. Z nalezených hodnot  $n$  lze také vypočítat místní hodnoty hustoty objektu a z nich pak další údaje.



Obr. 3.3 Odchýlení paprsku v nehomogenním prostředí

### 3.2.1 Stínová metoda

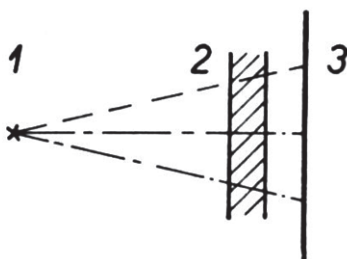
Metoda tohoto druhu je určena ke zjišťování opticky nehomogenního prostředí. Prostředí lze definovat jako takové, v němž index lomu světla není konstantní. Optické nehomogenity v jinak homogenním prostředí mohou vzniknout různými fyzikálními vlivy, např. nerovnoměrným oteplením, rozložením sil, prouděním, popřípadě elektrickým nebo magnetickým polem.

Šlíry nazýváme místa v průhledném homogenním prostředí, v nichž je index lomu světla odchýlný od střední hodnoty. Změna indexu lomu světla ve šlíře způsobí odchylku světelného paprsku vůči ostatním paprskům procházejícím homogenním prostředím. Poněvadž odchylky vlivem změněného indexu lomu světla jsou poměrně nepatrné, dají se nejlépe zjistit na kontrastním rozhraní tmavé a osvětlené plochy.

Optické zařízení, potřebné k realizaci metody, bývá uspořádáno dvěma způsoby:

- a) s rozbíhajícím se světelným svazkem v měřicím prostoru,
- b) s rovnoběžným svazkem paprsků.

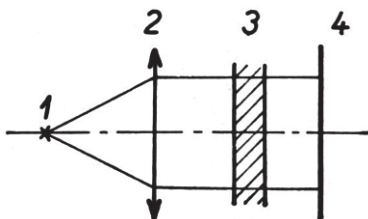
První způsob nevyžaduje žádnou optiku. Zkoumané prostředí se osvětlí bodovým zdrojem světla, kterým se obraz prostředí promítne na vzdálené stínítko (obr. 3.4), na němž se pozorují změny světelné intenzity ve šlířách, které se projevují jako tmavá místa v obraze.



**Obr 3.4** Stínová metoda s rozbíhajícím se světelným svazkem (1-zdroj světla, 2-vyšetřovaná vrstva plynu, 3-stínítko)

Jako zdroj světla se nejčastěji používá výbojek, žárovek, obloukovek. Původně byl jako zdroj používán jiskrový výboj, získaný vybitím kondenzátoru přes jiskřiště. Tohoto způsobu bylo použito pro získávání obrazu kolem letících střel i pro sledování pohybu nestabilních tlakových vln. Výhodou metody je její jednoduchost. Nevýhodou je malá citlivost. Obraz šlír je obvykle málo kontrastní a metoda je vhodná tam, kde nepožadujeme velkou citlivost.

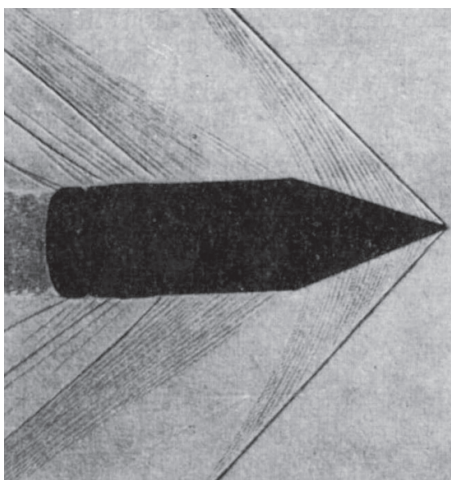
Pro získávání obrazů dvourozměrného proudění se pozorovaná vrstva vzduchu musí prosvěcovat rovnoběžným svazkem paprsků. Oproti prvnímu způsobu zde přibude jedna čočka nebo konkávní zrcadlo (obr. 3.5).



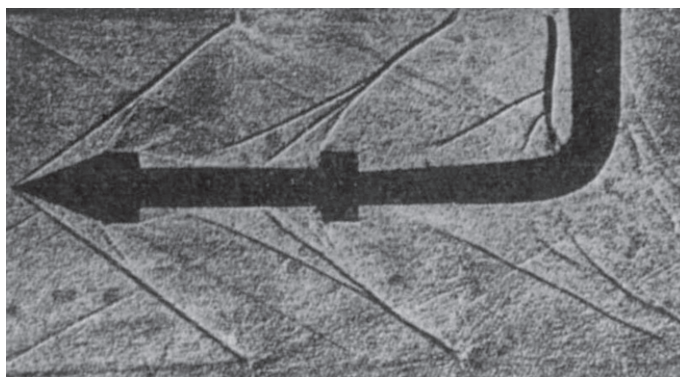
**Obr 3.5** Stínová metoda s rovnoběžným světelným svazkem (1-zdroj světla, 2-čočka, 3-vyšetřovaná vrstva plynu, 4-stínítko)

Ohniskovou délku je výhodné volit co nejkratší, aby se dosáhlo při daném zdroji světla vysokého osvětlení stínítka. To se však nesmí dít na úkor rovnoměrnosti počátečního osvětlení stínítka a ostrého zobrazení nehomogenit. Snížení ostrosti závisí totiž na ohniskové délce  $f_l$ , přímo na vzdálenosti  $L$  od stínítka nebo filmu a také přímo na průměru zdroje světla  $d$ . Citlivost závisí přímo na vzdálenosti  $L$ . Jelikož  $d$  není možno zmenšovat bez omezení, je nutno volit  $f_l$  i s ohledem na tyto činitele.

Této metody bylo použito pro sledování tvaru rázových vln, obtékání součástí letadla za letu, mezní vrstvy a přechodových oblastí. Pomocí přerušovaného zdroje světla (stroboskopu) lze sledovat kmitání rázových vln. Obrázky 3.6 až 3.8 jsou pořízeny stínovou metodou [1].

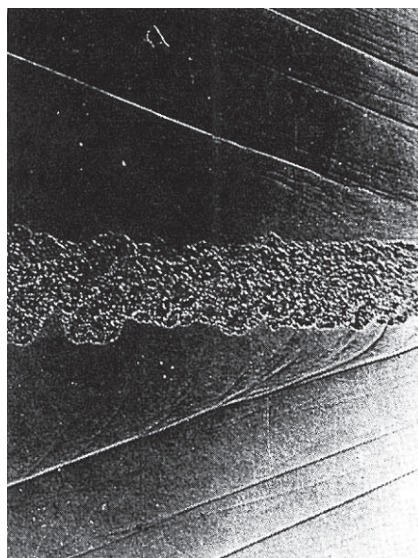


**Obr 3.6** Stínový obraz proudového pole v okolí střely



**Obr 3.7** Stínový obraz rázových vln

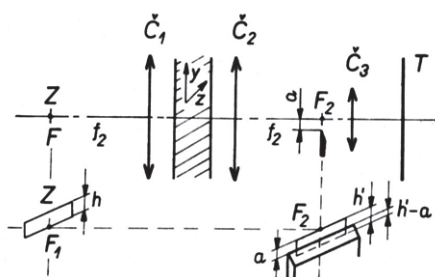




**Obr 3.8** Stínový obraz úplavu

### 3.2.2 Clonkové šlírové metody

Toeplerův způsob je nejčastěji užívaný při sestavování optických zařízení (obr. 3.9). Obdélníkový zdroj záření je umístěn v ohniskové rovině první čočky  $\check{C}1$ . Zkoumanou vrstvou (měřícím prostorem tunelu) pak prochází, je-li vrstva homogenní svazek rovnoběžných paprsků. Čočka  $\check{C}2$  umístěná za měřícím prostorem, vytvoří obraz zdroje světla ve své ohniskové rovině a na stínítku se získá obraz měřícího prostoru, v němž je například umístěn studovaný model. Ke zobrazení se použije čočky  $\check{C}3$ .



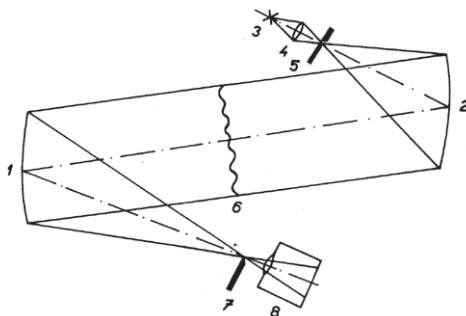
**Obr 3.9** Clonková šlírová metoda, uspořádání podle Toeplera

Je-li zkoumaná vrstva homogenní, bude mít jeho obraz v celé ploše stejný jas. Vloží-li se do ohniskové roviny čočky  $\check{C}2$  nožová clonka tak, aby zachytila část paprsků dopadajících na stínítko, sníží se jejich osvětlení, ale bude opět ve všech místech osvětlené plochy stínítka stejné. Nastavení vzdálenosti  $a$  závisí na tom, jak velkou část obrazu zdroje světla clonka zastíní. Je-li v některém místě zkoumané vrstvy nehomogenita, dojde k zakřivení paprsků procházejících těmito místy a část obrazu zdroje se posune z původního místa o vzdálenost  $\Delta s$ . Obraz šlíry se



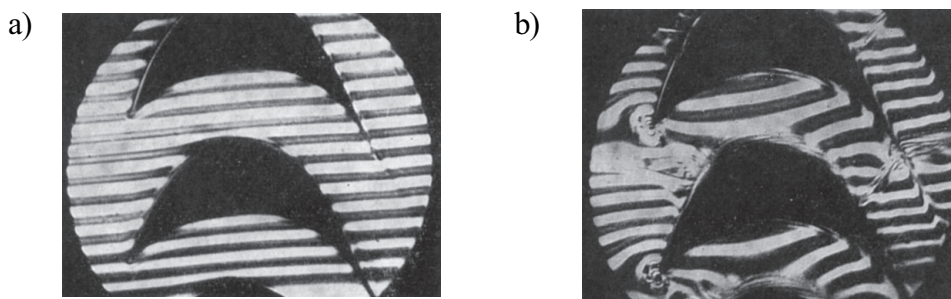
bude proto jevit světlejší nebo temnější vůči ostatním homogenním místům předmětu, a to podle toho, zda šlíra odchyluje paprsky směrem od šlírové clony nebo k ní. Volíme-li zdroj světla ve formě kruhové plošky a břitovou clonu nahradíme kruhovým terčíkem, můžeme pozorovat všechny šířky libovolného směru jako světlejší místa.

Pro zobrazení velkých předmětů, je nutné místo čoček použít zrcadel ( obr. 3.10)



**Obr 3.10** Toeplerovo uspořádání pro pozorování šlír v rozměrném poli (1, 2-sférická zrcadla, 3-zdroj světla, 4-kondenzor, 5-štěrbina, 6-šlíra, 7-břit, 8-fotografický objektiv)

Další způsob získávání kvantitativních údajů můžeme nazvat nitkovou, případně mřížkovou metodou (obr. 3.11). Zdroj je i tentokrát šterbinový, a to co nejužší, místo nožové clonky se vkládá do ohniskové roviny druhé čočky buď tenké vlákno (nit) nebo několik rovnoběžných vláken (mřížka), přičemž vlákna jsou v obou případech rovnoběžná s osou šterbiny.



**Obr 3.11** Mřížková šlírová metoda, lopatková mříž a) bez proudění, b) při proudění

### 3.2.3 Interferometrické metody

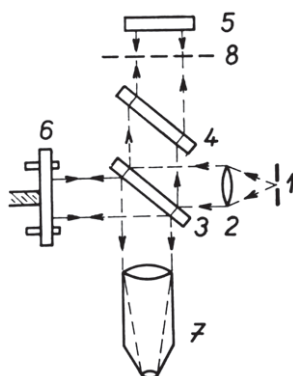
Interferometrická metoda vyžaduje mnohem složitější a nákladnější zařízení a klade také větší nároky na obsluhu. Může poskytnout co nejpřesnější údaje o hustotním poli ve zkoumané vrstvě.

Při této metodě je použit zdroj světla ze kterého se získají dva paprsky, z nichž jeden prochází nehomogenní vrstvou, ve kterém zjišťujeme pole indexu lomu. Kdežto druhý prochází srovnávací vrstvou (například vrstvou stejných vlastností, jaké měla zkoumaná vrstva, když byla bez nehomogenit a měla proto všude týž index lomu). Základní fázový rozdíl se dostane tím, že pomocí zrcadel projde odražené světlo nehomogenním prostředím a toto světlo interferuje

se světlem homogenního prostředí.

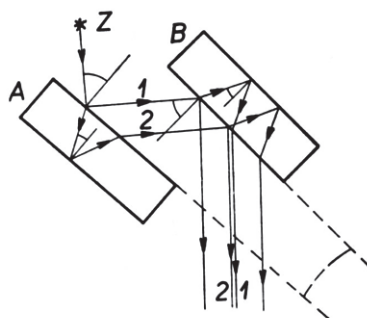
Není-li mezi oběma prostředími rozdíl, objeví se v bílém světle soustava rovnoběžných pruhů po celé ploše obrazu. Vzniklé tmavé a světlé proužky se nazývají interferenční proužky. Jsou-li v některých místech fázové odchylky vlivem změny indexu lomu světla, změní se v těchto místech soustava rovnoběžných pruhů na tvary odpovídající změnám indexu lomu světla.

Interferenční obrazce se získají pomocí interferometrů. Michelsonův interferometr (obr. 3.12) však má tu nevýhodu, že v něm paprsky procházejí zkoumanou vrstvou dvakrát, což může způsobit nepřesnosti při vyhodnocování záznamů.



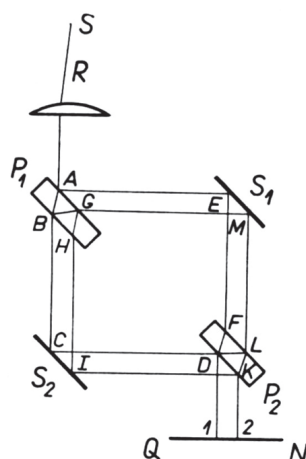
**Obr 3.12** Michelsonův interferometr (1-zdroj světla, 2-čočka vytvářející rovnoběžný svazek paprsků, 3- planparalelní skleněná deska s reflektující polopropustnou vrstvou, 4-jako u 3, ale bez reflektující vrstvy, 5-pevné zrcadlo, 6-pohyblivé zrcadlo, 7-pozorovací dalekohled, 8-rovina obrazu odrazové plochy zrcadla)

U Jaminova interferometru (obr. 3.13) je zase na obtíž malá vzdálenost obou oddělených svazků, které později navzájem interferují, jeho použití je omezeno na případy, kdy je jeden z příčných rozměrů zkoumané vrstvy dosti malý, jako je tomu například při studiu mezní vrstvy.



**Obr 3.13** Michelsonův interferometr (1-zdroj světla, 2-čočka vytvářející rovnoběžný svazek paprsků, 3- planparalelní skleněná deska s reflektující polopropustnou vrstvou, 4-jako u 3, ale bez reflektující vrstvy, 5-pevné zrcadlo, 6-pohyblivé zrcadlo, 7-pozorovací dalekohled, 8-rovina obrazu odrazové plochy zrcadla 6)

Pro potřeby experimentální aerodynamiky se však používá Machův-Zehnderův interferometr (obr. 3.14). Má výhodu oproti dvěma předchozím, že světlo prochází zkoumanou vrstvou jen jednou, a že oddělené svazky paprsků je možno od sebe oddálit na dosti velkou vzdálenost, takže v případě potřeby prochází měřicím prostorem jen jeden svazek paprsků a druhý jde zcela mimo.



**Obr 3.14** Machův-Zehnderův interferometr ( $S$ -zdroj světla,  $S_1$  a  $S_2$ -rovinné zrcadlo,  $P_1$  a  $P_2$ -planparalelní polopropustná skleněná deska)

Zařízení pracuje tak, že paralelní svazek paprsků vycházejících z bodového zdroje  $S$  se dělí na polopropustné desce  $P_1$ . Části paprsků projdou s úplným odrazem na zrcadle  $S_1$  a  $S_2$  jako srovnávací a měřicí svazek paprsků k další částečně polopropustné desce  $P_2$  a celkové světlo prochází v případě trajektorie odraženého paprsku do bodu 1 či 2 a dále pak na stínítko. Jako zdroje světla se používá vysokotlaké rtuťové výbojky a k mžikovým snímkům vysokonapěťové zařízení, které se také dá použít pro vysokofrekvenční rychlosti filmovací kamery.

Obrázky 3.15 až 3.18 jsou pořízeny interferometrickou metodou [1].

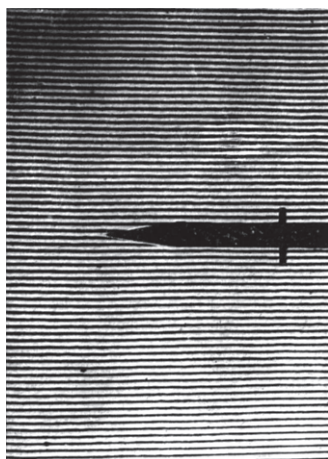


**Obr 3.15** Obtékání křídla

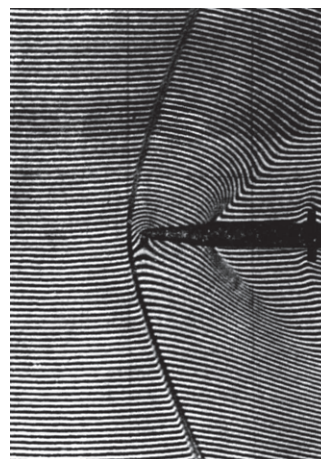


**Obr 3.16** Obtékání křídla mřížkou  
původního rozložení interferenčních pruhů

Interferometrické metody lze využít pro studium velkého množství rozličných případů proudění v širokém oboru Machových čísel od  $Ma=0,2$  až po vysoko nadzvukové případy. Lze jich použít i při velmi nízkých tlacích. Metoda se také velmi dobře hodí pro sledování nestabilních dějů.



Obr. 3.17 Proudové pole bez nehomogenit



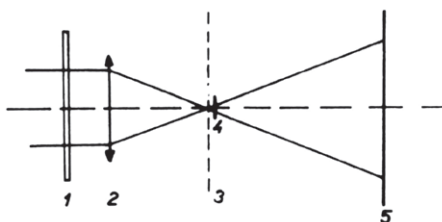
Obr. 3.18 Proudové pole s homogenitami

Oproti šlírově metodě, která umožňuje zobrazit gradienty indexu lomu, zobrazuje interferenční metoda přímo velikosti indexu lomu světla, které jsou integračními křivkami gradientu indexu lomu. Proto jsou interferenční metody vhodné pro plošná zobrazení polí s poměrně malými gradienty, kdežto šlírové metody jsou naopak vhodné k zobrazení velkých gradientů v mezních vrstvách apod.

### 3.2.4 Metoda fázového kontrastu

Při této metodě se používá stejného základního vybavení jako pro clonkovou šlírovou metodu, avšak používá se monochromatického světla. Je to tedy zařízení mnohem méně nákladné a méně choulostivé, snadnější k pořízení než Machův-Zehnderův interferometr. Metodou fázového kontrastu se zobrazí oblast šlír, jejichž index lomu se velmi málo liší od opticky homogenního prostředí, ale dává určitý fázový rozdíl paprskům jimi procházejícím.

Do ohniskové roviny 3 zobrazujícího objektivu 2 (obr. 3.19) umístíme průhlednou fázovou vrstvu 4, která zakrývá obraz světelného zdroje. Její optická tloušťka má být taková, aby vyvolala dráhový rozdíl  $\lambda/4$ , chceme-li, aby se šlíra se změnou indexu lomu světla jevila tmavší než pozadí. Naopak pro dosažení šlíry světlejší na tmavším pozadí, volíme fázovou vrstvu se zpožděním  $3\lambda/4$ .

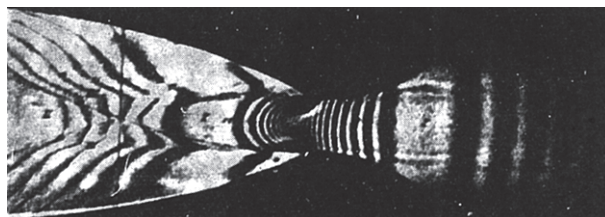


Obr. 3.19 Metoda fázového kontrastu (1-průhledná destička se šlírami, 2-zobrazující objektiv, 3-ohnisková rovina, 4-průhledná fázová vrstva, 5-rovina zobrazení)

Zobrazení kontrastu na místě změny indexu lomu zde nastává interferencí na hraně šlíry. Volíme zde fázovou vrstvu s částečně absorbujícím světlem tak, abychom dosáhli nejvhodnějšího poměru světelných intenzit k snadnému znázornění kontrastu.

Tedy metoda fázového kontrastu se hodí zejména k zjišťování drobných šlír. Na velkých šlírách se neuplatní ohybové jevy na hraně šlíry. Metoda snižuje celkový kontrast obrazu na úkor detailů.

Obrázek 3.20 je pořízený metodou fázového kontrastu.



*Obr. 3.20 Metoda fázového kontrastu, proudění v trysce*

### 3.2.5 Metody využívající zeslabení elektromagnetického nebo korpuskulárního záření při průchodu proudícím plynem

Předchozími metodami je možno zjišťovat velmi malé rozdíly hustoty plynu v měřicím prostoru běžného typu, ale žádná z těchto metod není použitelná při nízkých hodnotách hustoty zkoumaného plynu. Projevení tohoto omezení se začíná projevovat při tlacích nižších než 10 torrů, kdy již optická tloušťka zkoumané vrstvy plynu v tunelu běžných rozměrů nedostačuje k získání průkazných výsledků. Proto pro měření za těchto podmínek byly vyvinuty nové metody. Vedle metod využívajících luminiscence, jsou to hlavně metody založené na zeslabení záření procházejícího zkoumaným proudícím plynem, způsobeným vlivem absorpce, popřípadě rozptylu. Jedná se o využití:

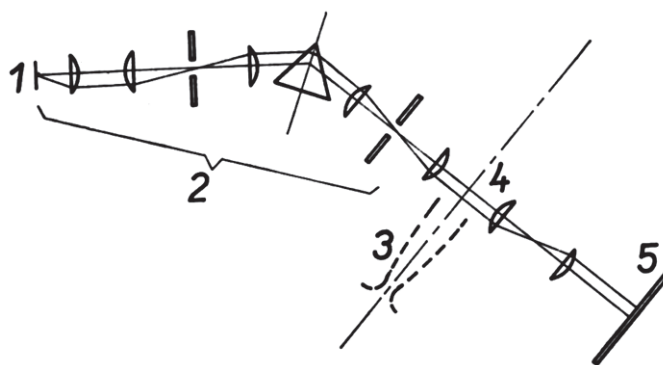
- absorpce ultrafialového záření kyslíkem (pro vlnové délky v rozmezí 140-150 nm)
- absorpce ultrafialového záření ozonem (pro vlnovou délku 253,7 nm)
- zeslabení měkkých rentgenových paprsků
- zeslabení korpuskulárních paprsků (elektronů, protonů, alfa částic, atomů draslíku)

Pomocí uvedených metod lze tedy vyšetřovat proudové pole, totiž změny hustot  $\rho$ , vyvolané prouděním. Základní údaje jsou v tabulce (tab. 3.21).

Druh použitého záření	ultrafialové záření	ultrafialové záření	rentgenové záření	elektronové paprsky
Vlastnosti záření vlnová délka [nm]	=147 rezonanční čára Xe	=253,7 rezonanční čára Hg	=1	energie od 4-60 keV
Druh zkoumaného plynu	jen O <sub>2</sub>	jen O <sub>3</sub>	jakýkoliv	jakýkoliv
hmotový součinitel zeslabení [m <sup>2</sup> /kg]	2,5 10 <sup>4</sup>	1,7 10 <sup>4</sup>	79	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
hustota nerozrušeného proudu [kg/m <sup>3</sup> ]	7,7 10 <sup>-4</sup>	1,2 10 <sup>-3</sup>	2,5 10 <sup>-1</sup>	2 10 <sup>-3</sup> -2 10 <sup>-4</sup>
p <sub>0</sub> statický tlak v měřicím prostoru [torr]	0,46	0,7	150	1,2-0,12

**Tab. 3.21** Základní údaje o metodách založené na zeslabení záření procházejícího zkoumaným proudícím plynem

Metodou využívající absorpce ultrafialového záření kyslíkem (obr. 3.22) byl např. získán obraz rázové vlny v kyslíku před špičkou kužele o vrcholovém úhlu 90° při Machově čísle 3,9. Průměr zkoumaného pole v měřicím prostoru je 3 cm. Pro zdroj ultrafialového záření byly použity olejem chlazené xenonové výbojky s okénkem fluoridu vápenatého. Z fluoridu vápenatého byly rovněž veškeré optické součásti. Je třeba udržovat v celém optickém zařízení tlak nižší než 10<sup>-4</sup> torrů.

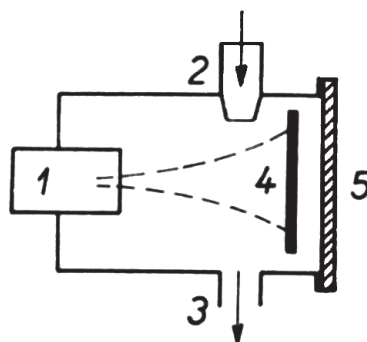


**Obr. 3.22** Metoda využívající absorpce ultrafialového záření kyslíkem (1-zdroj ultrafialového záření, 2-monochromátor, 3-tryska, 4měřicí prostor, 5-rovina obrazu)



Pro metodu využívající zeslabení měkkých rentgenových paprsků se používá rentgenka a snímač (detektor) intenzity rentgenových paprsků, tedy např. ionizační komůrka nebo Geigerův-Müllerův počítač. Jde o umístění proti sobě na opačných stranách aerodynamického tunelu tak, aby jimi bylo možno společně pohybovat napříč i kolem měřicí části tohoto tunelu. Je však možné umístit je i nepohyblivě a pohybovat modelem v tunelu. Použitá rentgenka musí mít vysokou emisi a malou plochu antikatody.

Poslední část skupiny tvoří metoda zeslabení elektronových paprsků (obr. 3.23). Použití je výhodné tam, kde není k příliš nízkému tlaku v měřicím prostoru možno použít interferometrické metody ani rentgenového záření.



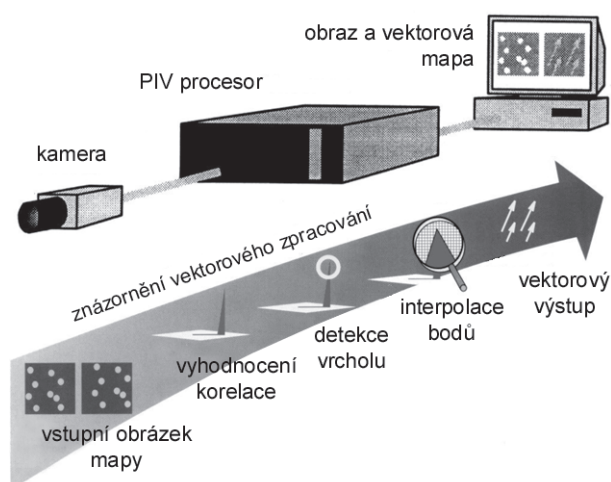
**Obr. 3.23** Zařízení pro získání elektronového stínového obrazu proudění  
(1-zdroj elektronů, 2-tryska, 3-připojení k vývěvě, 4-fluorescenční stínítka, 5-skleněné okénko)

Zařízení, pro získání elektronového stínového obrazu tvoří vzduchotěsná komora, uzavřená na jednom konci skleněným okénkem, jímž se zvenku pozoruje nebo fotografuje stínítka. Sledovaný proud plynu vstupuje tryskou do komory, kde se udržuje potřebné vakuum pomocí vývěvy. Uvnitř komory je uložen zdroj elektronových paprsků, kterému se říká elektronové dělo. Tento svazek paprsků dopadá kolmo na průsvitné fluorescenční stínítka, na němž vytvoří kruhovou světelnou stopu. Je-li vstupní energie elektronů v rozmezí 3-25 keV a tlak v komoře v rozmezí 1-20 torrů, potom při vzdálenosti  $s_0=65$  mm (vzdálenost zdroje elektronů od fluorescenčního stínítka) má světelná kruhová stopa v kterémkoliv bodě jas stejný do průměru zhruba 20 mm. Od toho průměru výše se jas zmenšuje, ale stínové obrazce je možno pozorovat za uvedených podmínek ještě při průměru stopy rovném 40 mm. Zeslabení jasu stěžuje fotografování, které lze odstranit použitím absorpčního vyrovnávacího filtru.

### 3.3 Metoda PIV

Particle Image Velocimetry s mezinárodně zavedenou zkratkou PIV lze volně přeložit jako "Měření rychlosti pomocí obrazu částic". Pro větší výstižnost je však vhodnější název Integrovaná laserová anemometrie.

PIV patří mezi moderní metody. Je schopna měřit rozložení rychlostí v dvourozměrném poli současně v jediném okamžiku. Princip metody (obr. 3.24) je založena na zaznamenávání



**Obr. 3.24** Přehled zpracování toku dat v počítači

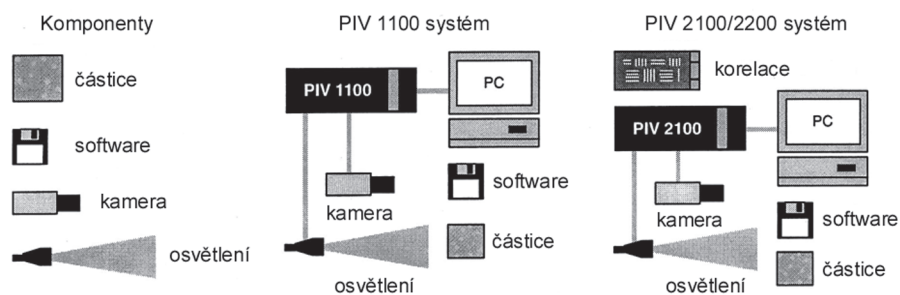
minimálně dvou obrazů unášených mikročastic. Doba mezi expozicemi je velmi krátká, je úměrná času potřebnému k přemístění unášených částic o vzdálenost přibližně jednoho až tří průměrů částic. Pomocí korelačních metod je potom porovnáváním takto získaných obrazů vyhodnoceno dvourozměrné rychlostní pole, jako jeden okamžitý stav sledované oblasti. Zjištěné rychlosti jsou průměty do roviny měření, složky kolmé na tuto rovinu nelze kvantifikovat. O zlomek (podle typu použité kamery 1/4 až 1/30) sekundy později můžeme získat další okamžitý stav a následně celou sérii. Je tedy zřejmé, že PIV je přímo předurčena pro sledování časového vývoje prostorových souvislostí ve zvoleném dvourozměrném řezu prostorem. Samozřejmě, že je také možno (statickým zpracováním série) poměrně rychle získávat časově střední informaci o kvazistacionárních proudových polích. Nevýhodou PIV je omezená použitelnost na složitá třírozměrná proudění, náročnější požadavky na optickou přístupnost sledované oblasti, podmínka průhlednosti měřeného média a z korelačních metod vyplývající omezená schopnost analyzovat velmi malé struktury v proudovém poli a vysoký gradient rychlosti v blízkosti stěn.

K úspěšnému použití měřicí metody PIV je nutno splnit následující čtyři úkoly:

- a) Nasytit proudící medium dostatečným množstvím vhodných částic. Měly by mít specifickou hmotnost co nejbližší k mediu, co nejlepší odrazové vlastnosti a velikost úměrnou k velikosti měřeného prostoru.
- b) Osvětlit zajímavou oblast velmi krátkými a výkonnými záblesky. Interval a doba trvání záblesků musí být v relaci k měřené rychlosti proudění.
- c) Zaznamenat dva (případně více) obrazy poloh unášených částí. Záznamové zařízení musí být také přiměřeně rychlé k měřené rychlosti proudění.



- d) Zpracovat obrazovou informaci na informaci o rozložení průmětů rychlostí do zvolené roviny měření.



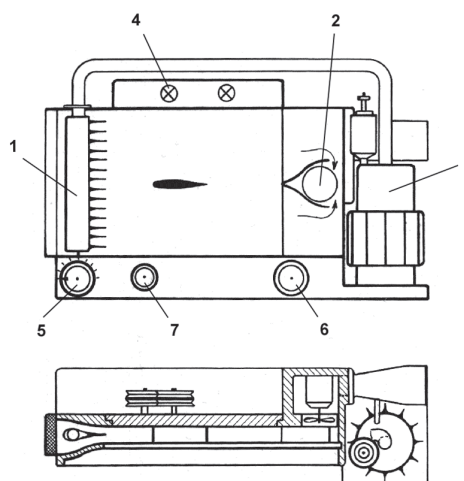
**Obr. 3.25** Vybavení jednotlivých systémů

Každé jednotlivé měření touto metodou je unikátní a obzvláště v případě nestacionárních proudění velmi žádoucí. Vybavení jednotlivých systémů (obr. 3.25).

## 4 KOUŘOVÝ TUNEL

### 4.1 Popis a princip kouřového tunelu

K praktické vizualizaci bylo použito malého dřevěného kouřového tunelu (o rozměrech:  $V \times Š \times H$  920x1060x660 mm), který využívá kouřových vláken (obr. 4.1). Pozorovací prostor na přední straně je z čírého skla ( $V \times Š \times H$  290x450x40 mm), osvětlený se shora dvěma 100 W žárovkami. Osa pro fotografické zařízení je kolmá na rovinu proudění. Zadní stěna tunelu je pokryta černým sametem.



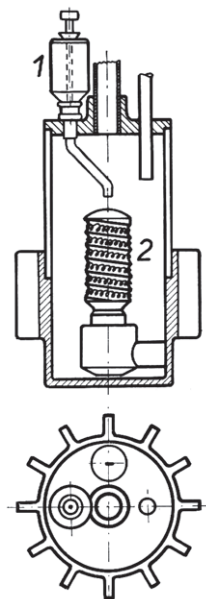
**Obr. 4.1** Schéma malého kouřového tunelu (1-hřebenová tryska, 2-ventilátor, 3-vyvíječ kouře, 4- žárovka, 5-regulátor otáček ventilátoru, 6-spínač osvětlení, 7-ovládání profilu)

Kouř se zavádí do tunelu kovovou hřebenovou tryskou, umístěnou před tělesem. Vnější tvar hřebenové trysky je upraven ve formě křídla. Kouř vystupuje jednotlivými otvory (29 otvorů o průměru 2 mm, které je možno podle potřeby nechat otevřené, či použít ucpávku pro uzavření), tvoří souvislá vlákna. Hlavním pohonem tunelu je ventilátor (umístěný na zadní straně s příkonem 250W), který nasává proud vzduchu s kouřovými vlákny. Tunel pracuje v laboratorních podmínkách ( $T_0=23^\circ\text{C}$ ,  $\phi=37\%$ ,  $p_0=731$  torrů) poměrně při nízkých rychlostech volného proudu 0,25-1,55 m/s, Reynoldsovo číslo  $Re$  se pohybuje mezi 164-2083 podle velikosti profilu. Rychlost proudění nesmí být příliš nízká, aby vlákna kouře neklesala, tj., aby se znatelně neprojevoval vliv tíže a také nesmí docházet k rozplývání vláken. Proto bylo pro dobrou viditelnost použito rychlosti 0,7 m/s.

### 4.2 Generátor kouře

Důležitou součástí pro funkčnost celého tunelu je vyvíječ kouře (obr. 4.2) se spalováním a odpařováním. Glycerínový olej odkapává ze zásobníku na topné těleso, kde se částečně odpařuje a část se ho spaluje. Páry kondenzují při vstupu do chladnějších součástí aparatury

generátoru v proudu vzduchu v malé kapičky, které spolu s částicemi pevného skupenství vzniklé spalováním tvoří aerosol potřebný k vizualizaci.



**Obr. 4.2** Generátor kouře se spalováním a odpařováním oleje (1-zásobník oleje, 2-topné těleso)

Topné těleso, ventilátor a dvě žárovky pro osvětlení se připojují k elektrické rozvodné síti 230V/50Hz.

### 4.3 Fotografie tunelu a použitých modelů

Barevné fotografie malého kouřového tunelu, ve kterém byla provedena vizualizace (obr. 4.3 - 4.4).

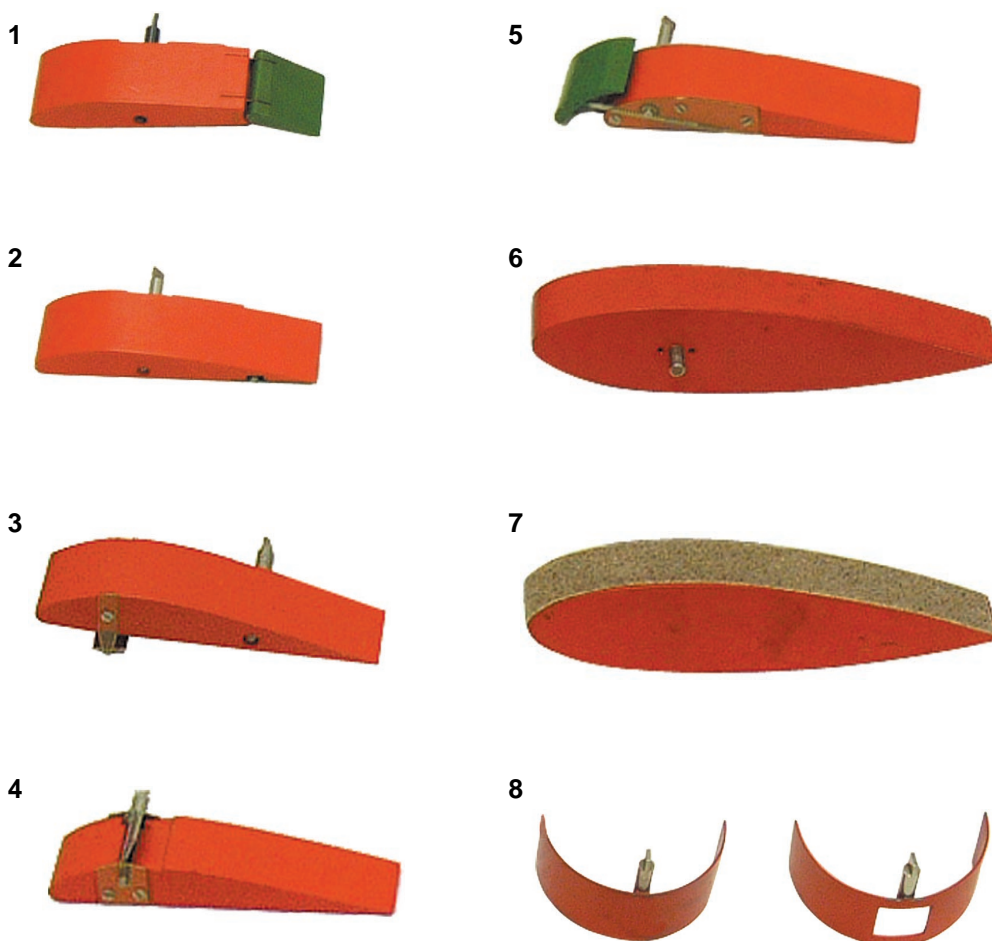


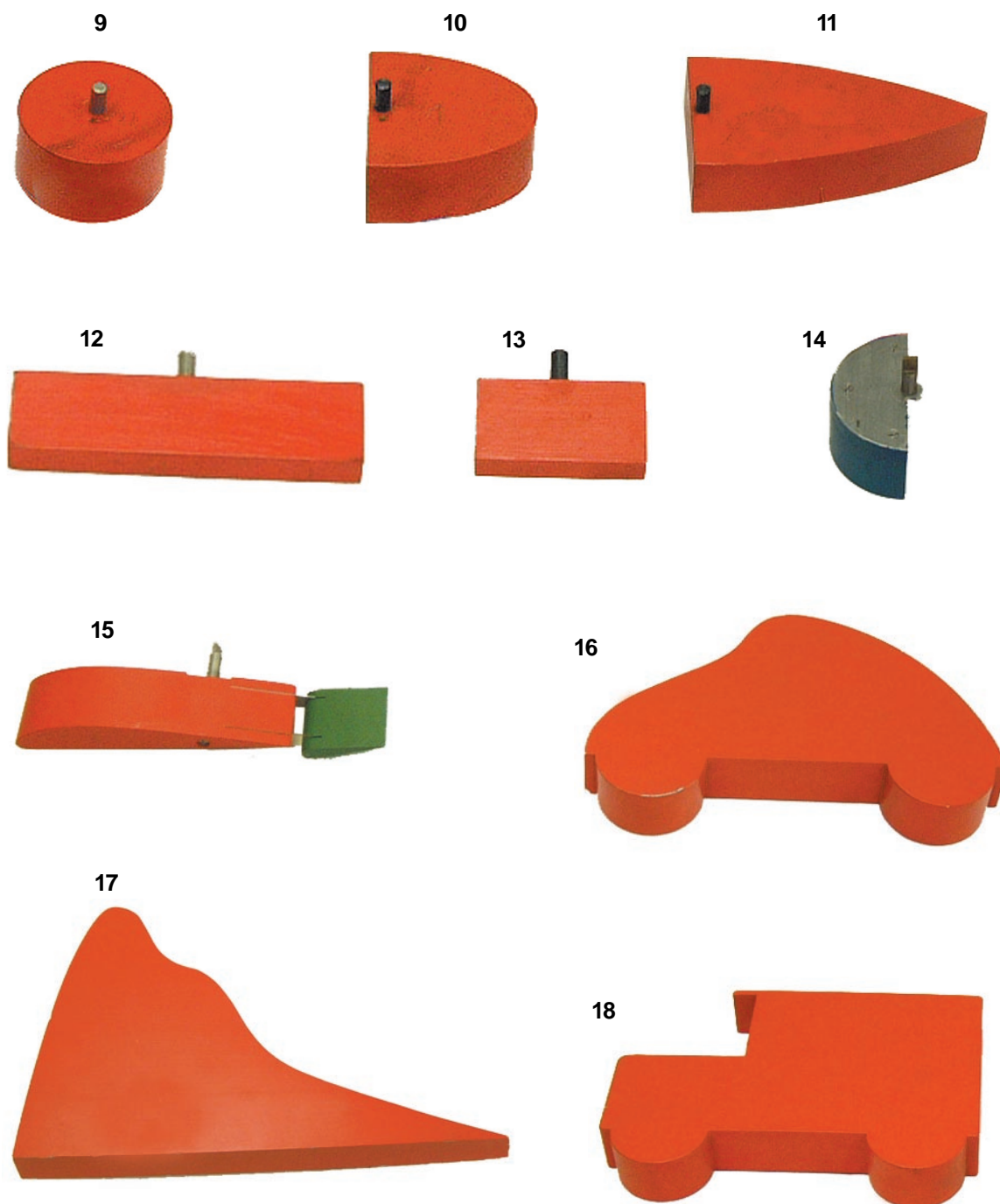
**Obr. 4.3** Fotografie malého kouřového tunelu



*Obr. 4.4 Fotografie malého kouřového tunelu*

Pro vizualizační experimenty v kouřovém tunelu byly použity profily s následujícím vyobrazením (obr. 4.5). Pro zachycení vizualizovaných jevů bylo použito normálního fotografického přístroje s expoziční dobou větší než  $2 \times 10^{-3}$  s. Nebylo potřeba dalšího přídavného osvětlení, postačilo osvětlení, které je součástí tunelu.





**Obr. 4.5** Profil č. 1-18 zachycený v kouřovém tunelu rychlokamerou, profil č. 1-12 zachycený fotoaparátem (1-jednoduchá klapka, 2-odklápěcí klapka, 3-odklopná aerodynamická brzda, 4-spoiler příčného řízení, 5-výsuvný slot, 6 a 7-symetrické křídlo, 8-polovina dutého válce, 9-válec, 10-tvar "U", 11-tvar "V", 12-deska, 13-deska, 14-polovina válce, 15-štěrbínová klapka, 16-automobil, 17-nesymetrický tvar, 18-automobil)

Vizualizované modely v probíhající kouřovém proudu se také podařilo zachytit pomocí digitální filmovací rychlokamery. Záznam z rychlokamery je uveden na příloženém CD nosiči, popis funkce kamery je popsána v kapitole 6.

## 5 VIZUALIZACE SMYKOVÝCH OBLASTÍ V KOUŘOVÉM TUNELU

### 5.1 Prostředky pro zvýšení vztlaku

Rovnováha sil v ustáleném vodorovném letu je dána podmínkami:

tah motoru = odpor letounu

váha letounu = vztlak letounu

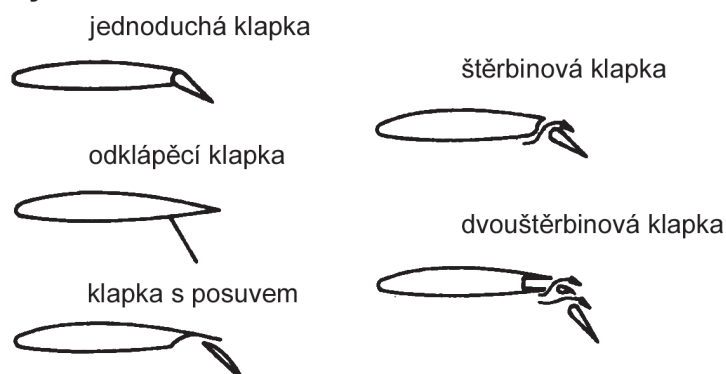
Prostředky pro zvýšení vztlaku se dělí do dvou skupin:

a) přírůstek vztlaku  $c_y$  se dosáhne změnou prohnutí profilu (různé druhy klapek)

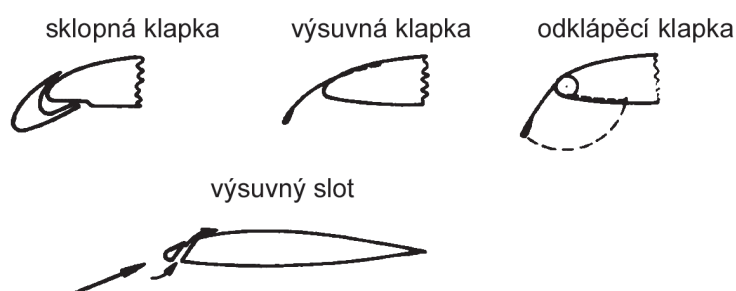
b) přírůstek vztlaku  $c_y$  se dosáhne úpravou mezní vrstvy (sloty, řízení mezní vrstvy)

Vyobrazení profilů s klapkami (obr. 5.1).

#### Klapky na odtokové hraně:



#### Klapky a sloty na náběžné hraně:

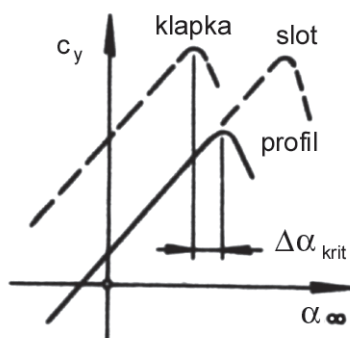


#### Řízení mezní vrstvy:



Obr. 5.1 Schémata profilů pro zvýšení vztlaku



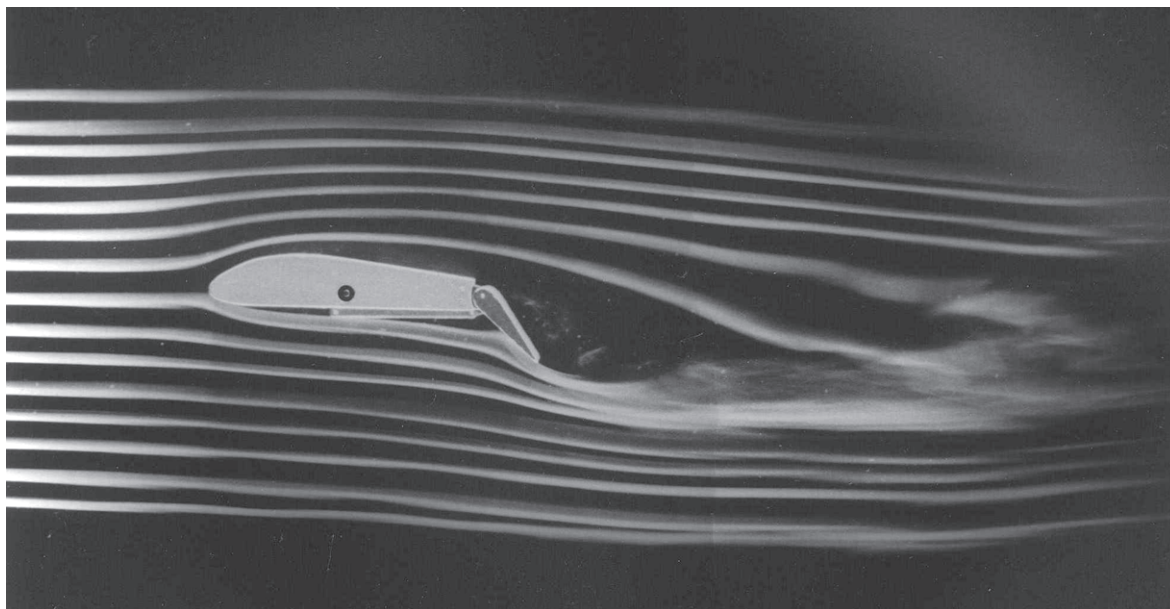


**Obr. 5.2** Závislost součinitele vztlaku  $c_y$  na úhlu náběhu

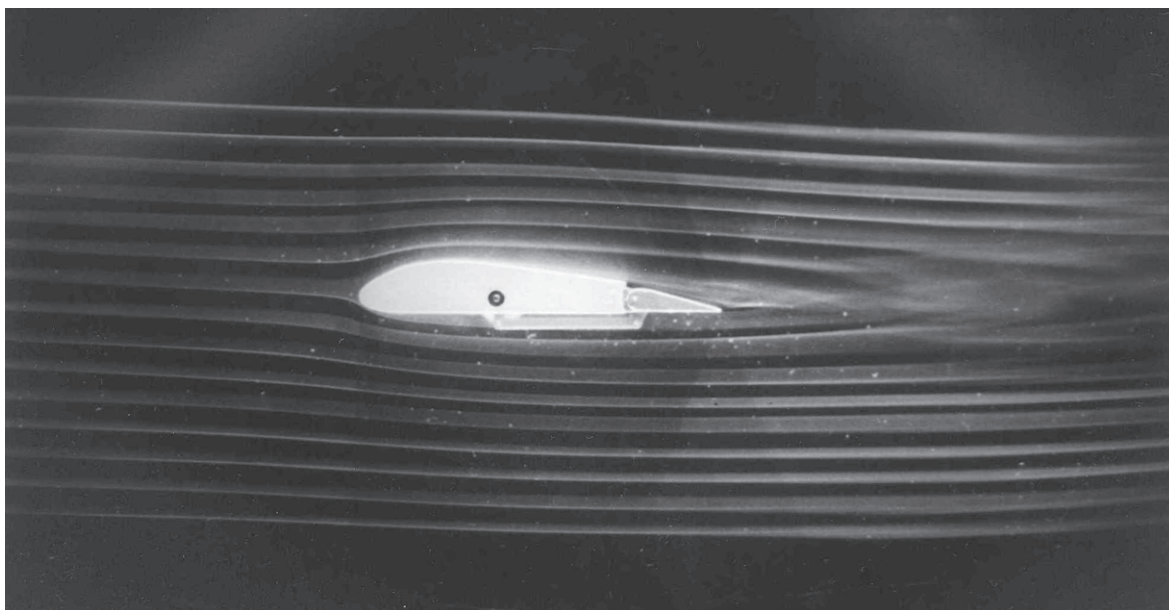
## 5.2 Jednoduchá klapka

Jedná se o klapku na odtokové hraně křídla. Při vychýlení zvětšuje zakřivení profilu křídla i efektivní úhel náběhu. Hlavním zdrojem přírůstku vztlaku je vzrůst zakřivení profilu, jehož vlivem nastává na dolní straně profilu přírůst přetlaku na horní přírůst sání.

Otevření klapky (obr. 5.3) má brzdový efekt, zvětšení úplavu, zvýší se adverzní gradient tlaku a odtržení nastává dříve než je tomu u profilu se stejným úhlem náběhu, vychylkou klapky  $0^\circ$  (obr. 5.4).

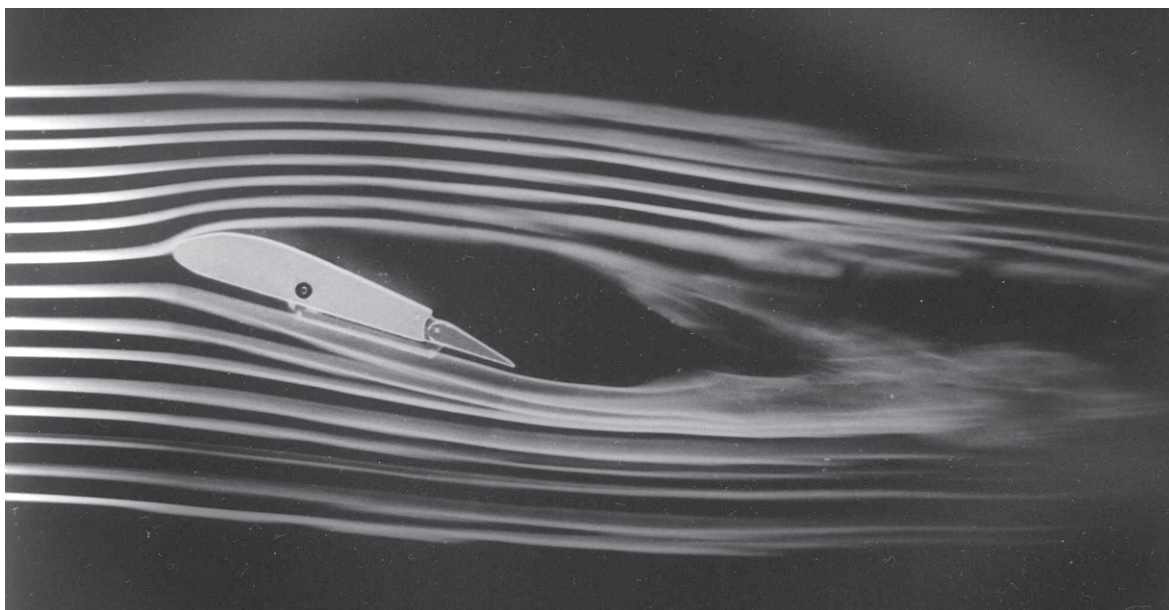


**Obr. 5.3** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=0^\circ$ , vychylka klapky  $50^\circ$ )



**Obr. 5.4** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )

Postupným otevíráním jednoduché klapky při stejném úhlu náběhu dochází ke zvětšení úplavu, odporu. U všech třech následujících profilů má klapka brzdňý efekt (obr. 5.5 - 5.7).

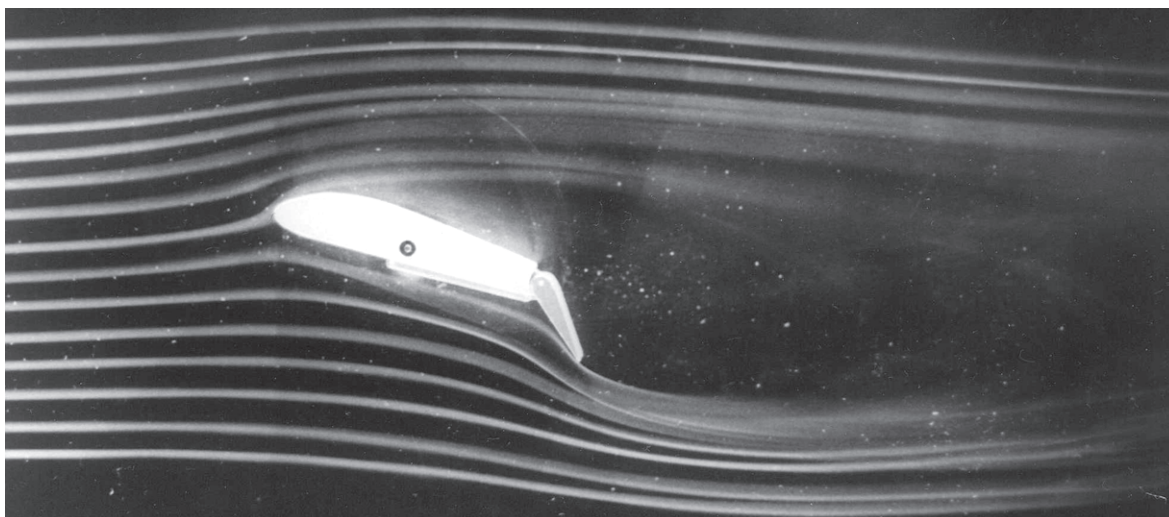


**Obr. 5.5** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )



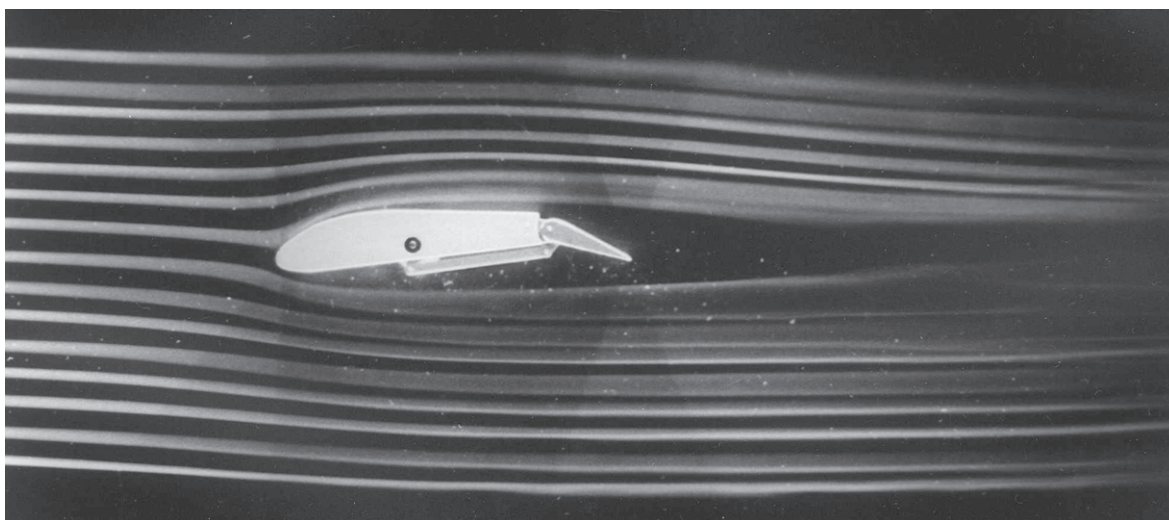


**Obr. 5.6** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka klapky  $25^\circ$ )



**Obr. 5.7** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka klapky  $50^\circ$ )

Natáčení klapky v úplavu nemá vliv na proudění (viz. obr. 5.8).

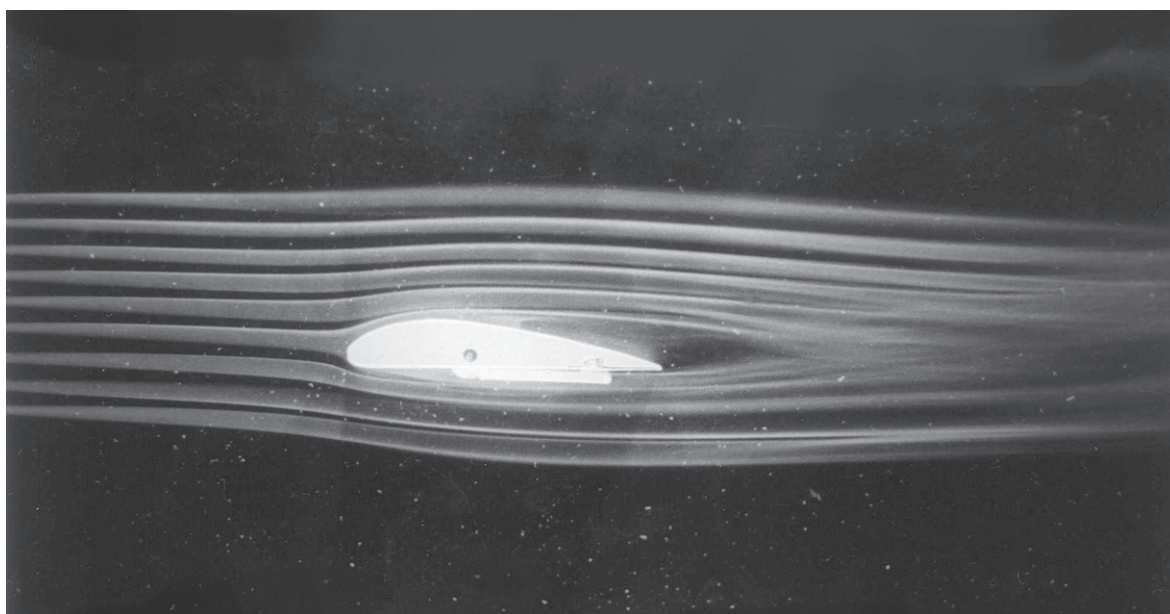


**Obr. 5.8** Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=-10^\circ$ , výchylka klapky  $25^\circ$ )

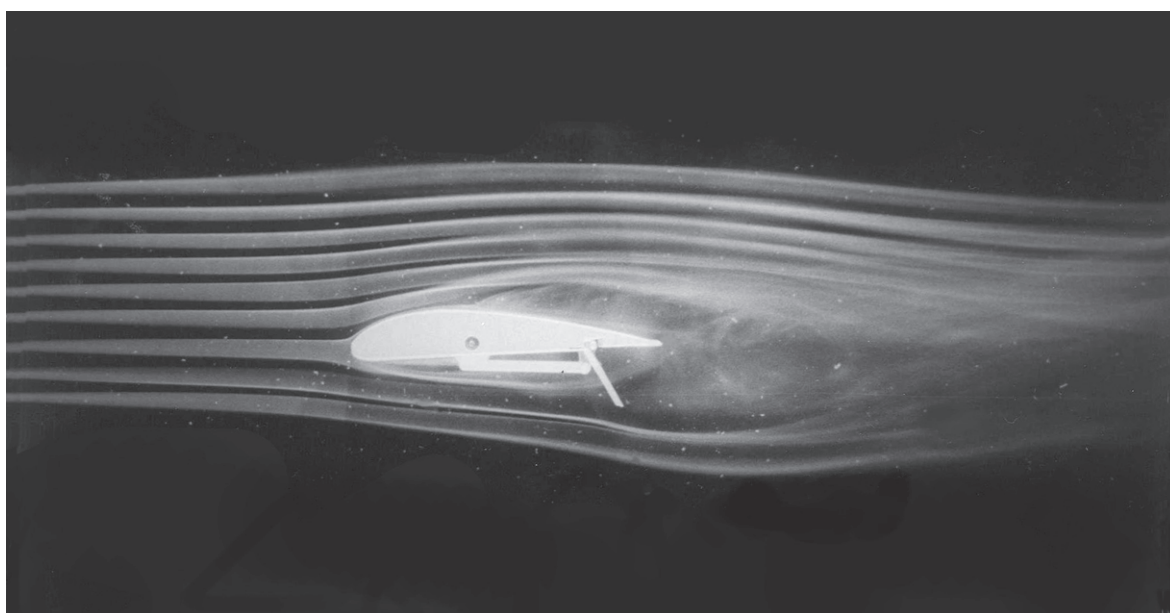
### 5.3 Odklápěcí klapka

Při vychýlení zvětšuje zakřivení profilu i efektivní úhel náběhu obdobně jako klapka jednoduchá. V prostoru mezi vychýlenou klapkou a křídlem vzniká oblast nižšího tlaku, do které je odsáván proud z horního povrchu křídla. Jedná se pak o přírůstek vztlaku, ale i zmenšení kritického úhlu náběhu. Odklápěcí klapka je vztlakově výhodnější než klapka jednoduchá, ale má větší odpor. Nejrozšířenější použití je u podzvukových letadel.

Zřetelně viditelné odtržení mezní vrstvy na křídle (obr. 5.9), při otevření klapky dochází k posunu odtržení mezní vrstvy směrem k náběžné hraně (obr. 5.10).

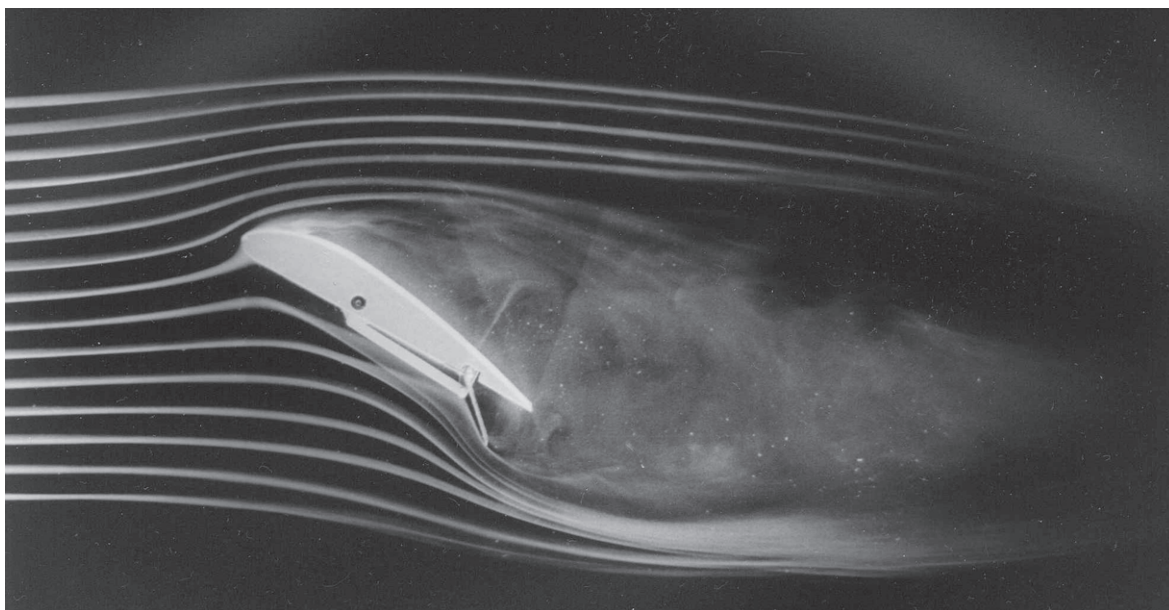


**Obr. 5.9** Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )



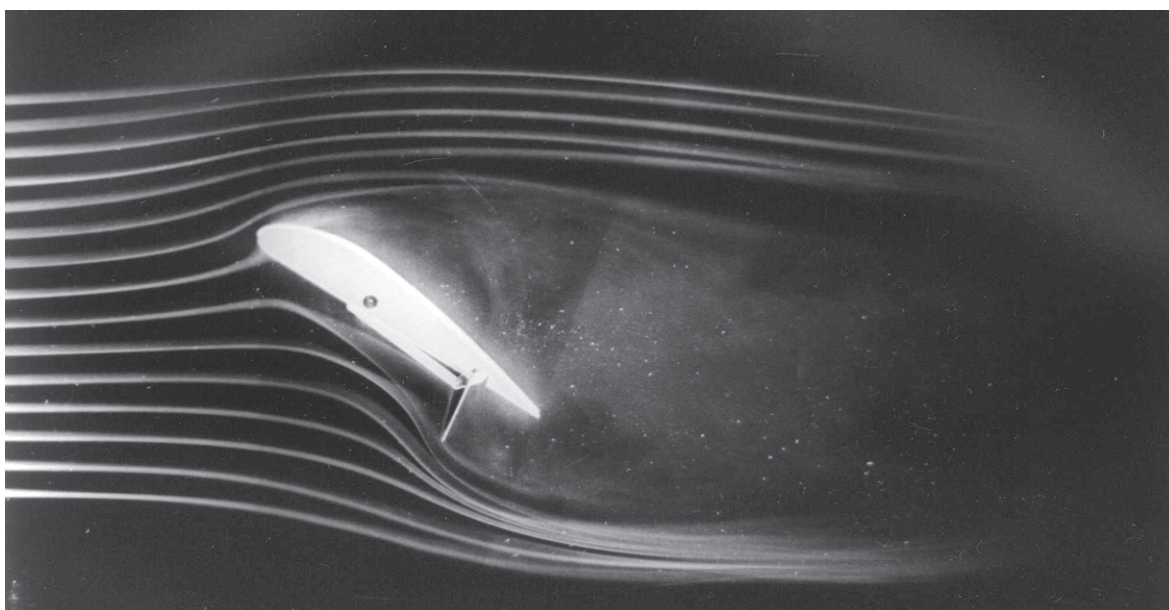
**Obr. 5.10** Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka klapky  $60^\circ$ )





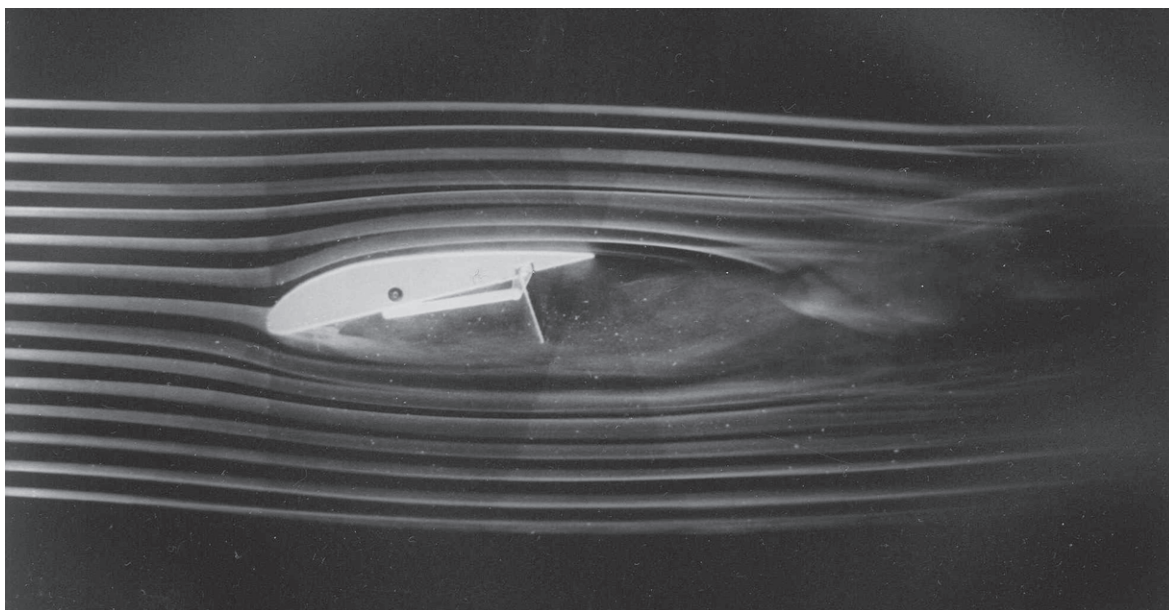
**Obr. 5.11** Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka klapky  $42^\circ$ )

Při otevírání odklápěcí klapky se stejným úhlem náběhu roste odpor (obr. 5.11 a 5.12).



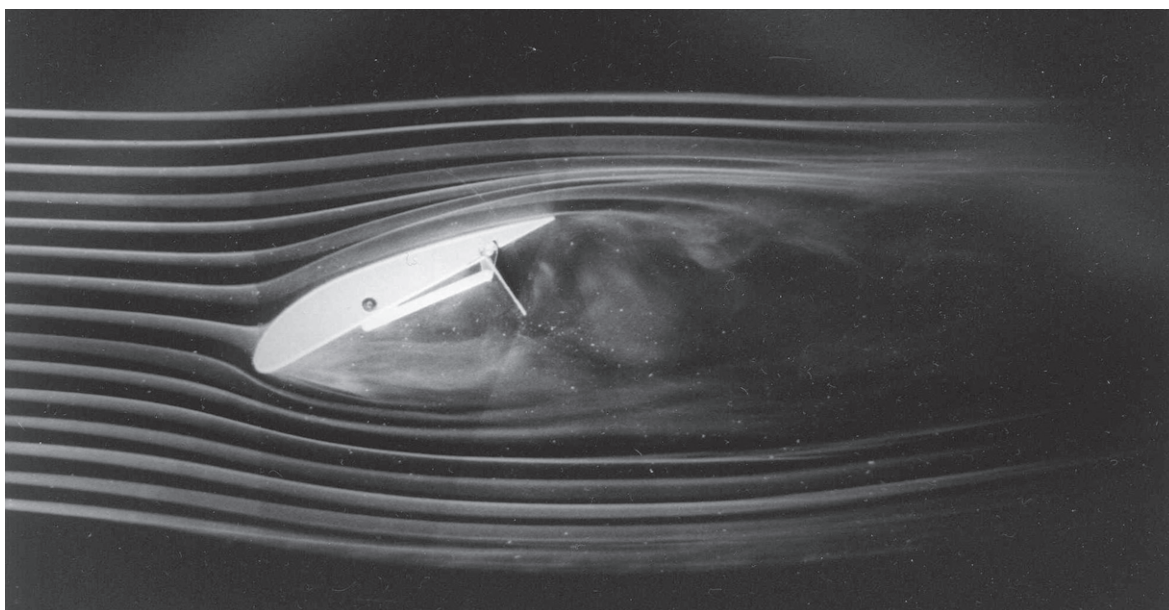
**Obr. 5.12** Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka klapky  $85^\circ$ )

Viditelný vzrůst odporu bez ztráty tlaku (obr. 5.13).



*Obr. 5.13 Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha = -15^\circ$ , výchylka klapky  $85^\circ$ )*

Odklápěcí klapka nemá brzdné vlastnosti pokud je v úplavu (obr. 5.15).

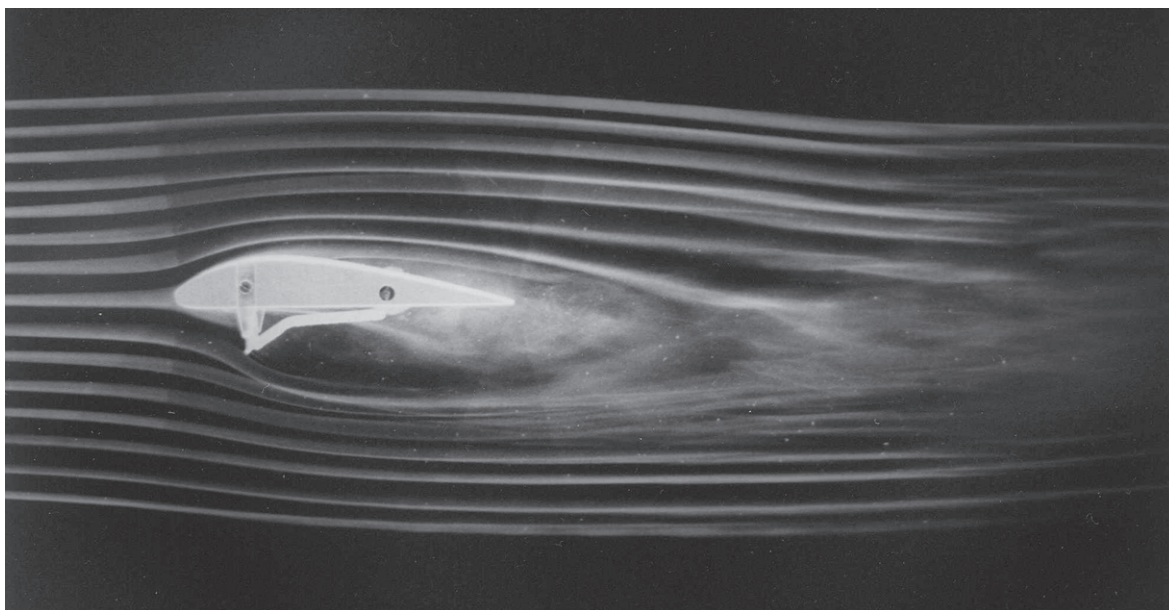


*Obr. 5.15 Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha = -30^\circ$ , výchylka klapky  $85^\circ$ )*

## 5.4 Odklopná aerodynamická brzda

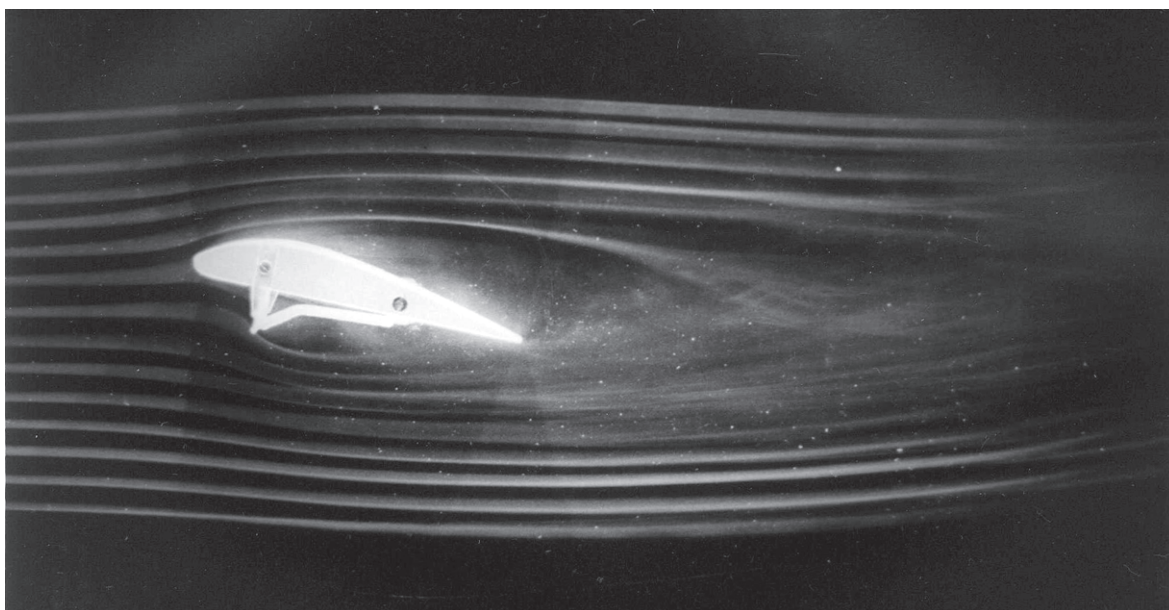
Používají se ke snížení rychlosti letu. Aerodynamické brzdy umístěné blíž k náběžné hraně jsou při menších úhlech náběhu účinnější, než brzdy na odtokové hraně. Vysunutá brzdná klapka (obr. 5.16) má za následek snížení rychlosti při letu, vektor rychlosti se odklání v přední části profilu.



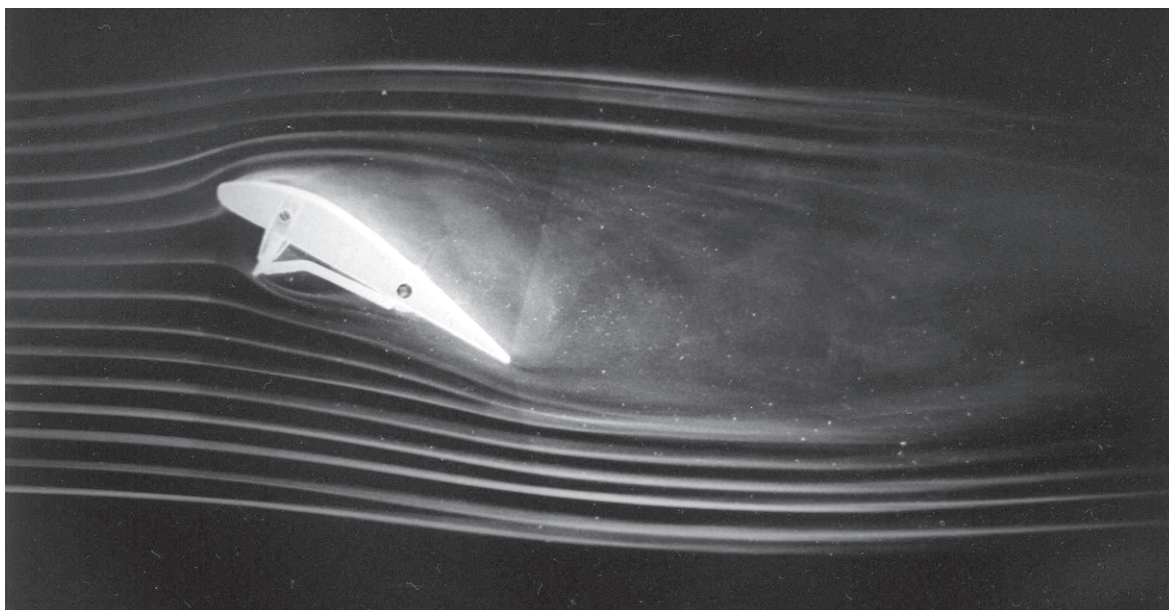


**Obr. 5.16** Profil křídla s aerodynamickou brzdou ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka brzdy  $90^\circ$ )

Kladné úhly náběhu s vysunutou brzdou klapkou mají vliv na brždění při letu (obr. 5.17 a 5.18)

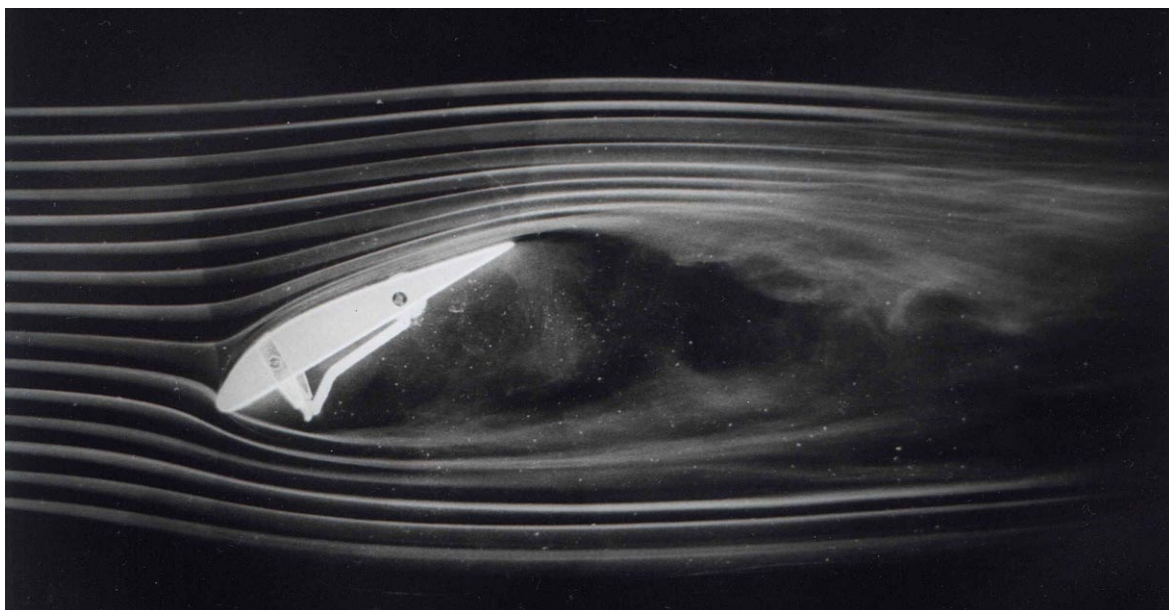


**Obr. 5.17** Profil křídla s aerodynamickou brzdou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka brzdy  $90^\circ$ )



**Obr. 5.18** Profil křídla s aerodynamickou brzdou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka brzdy  $90^\circ$ )

Při záporných úhlech náběhu (viz. obr. 5.19) nemá brzdná klapka žádný efekt.

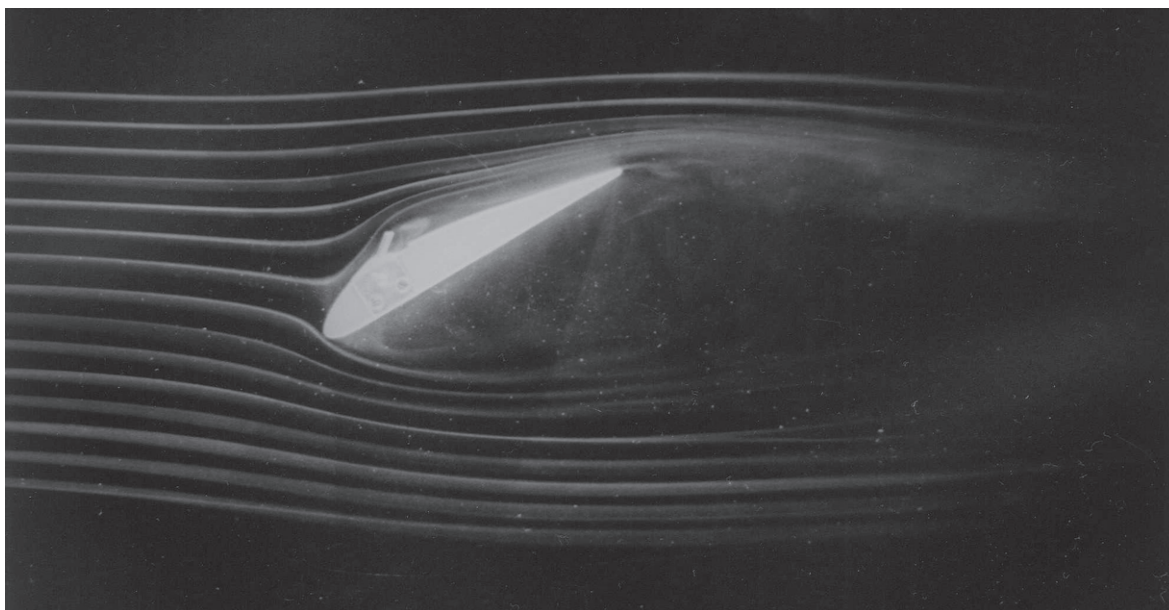


**Obr. 5.19** Profil křídla s aerodynamickou brzdou ( $\alpha=-30^\circ$ , výchylka brzdy  $90^\circ$ )

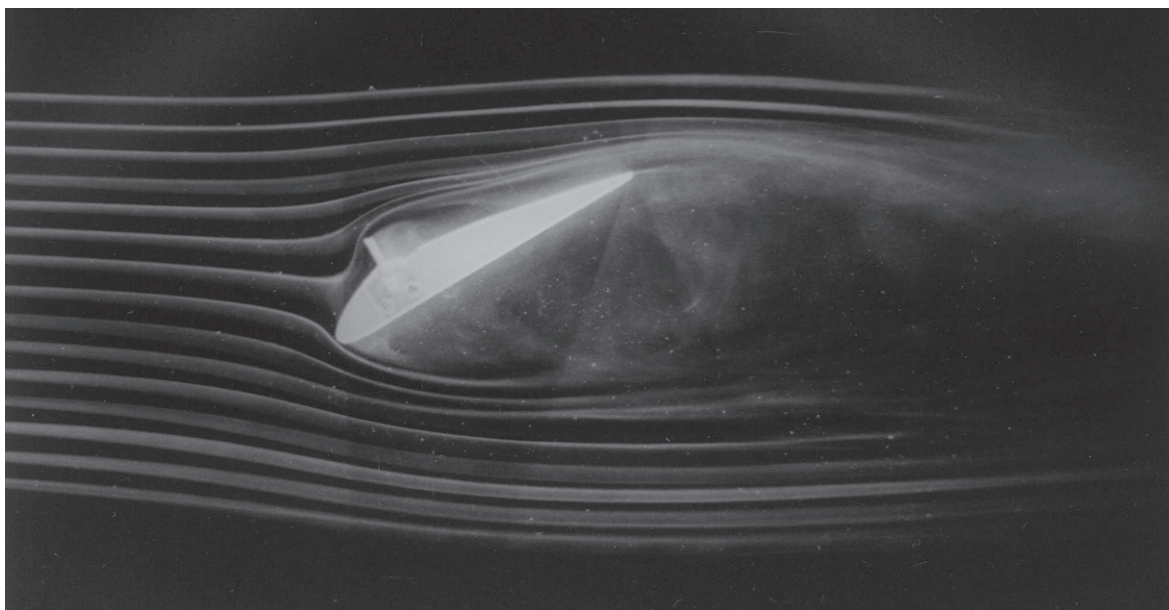
## 5.5 Spoiler příčného řízení

Jedná se o deskovou odklápěcí plošku umístěnou na horní straně nosné plochy. Při otevření spoileru (obr. 5.20 a 5.21) dojde ke zvýšení tlaku před tímto spoilerem a za ním po odtržení proudu se tlak rovněž zvýší. Tento vzrůst tlaku způsobí pokles sání a tím i vztlaku na té části křídla, na níž je spoiler umístěn. Spoilerem se tak vlastně ovládá rozložení vztlaku na křídle.



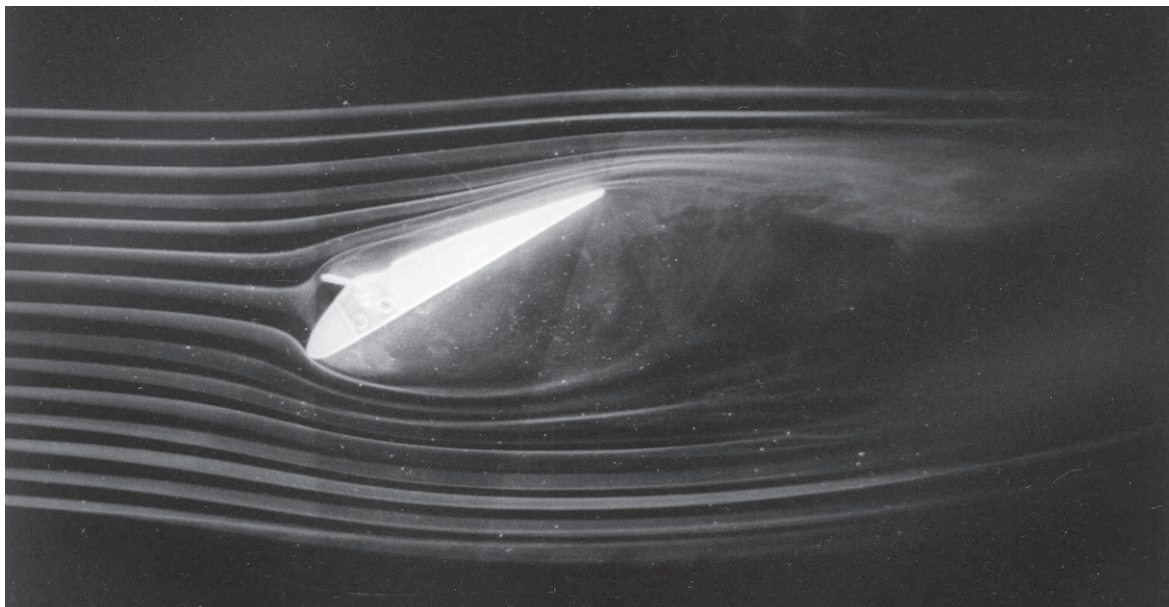


**Obr. 5.20** Profil křídla se spoilerem ( $\alpha = -30^\circ$ , výchylka spoileru  $45^\circ$ )

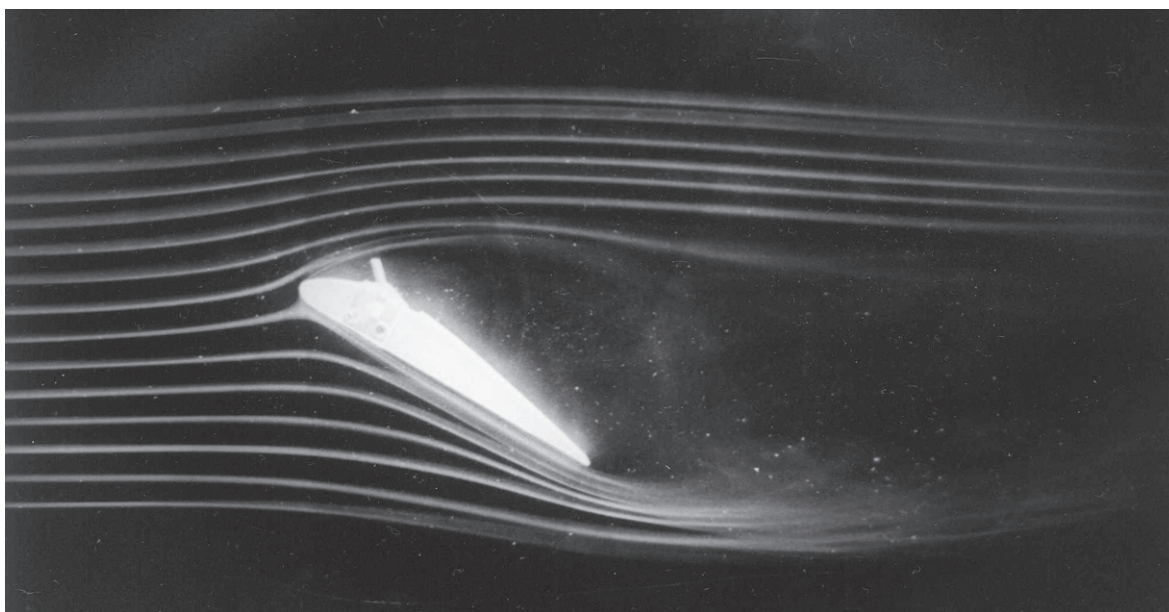


**Obr. 5.21** Profil křídla se spoilerem ( $\alpha = -30^\circ$ , výchylka spoileru  $90^\circ$ )

Velikost úplavu (obr. 5.22 a 5.23) je zde stejný, na obr. 5.23 při tomto úhlu náběhu nemá spoiler již téměř žádný účinek, vztlak zde není, ale zvětšil se brzdný odpor.



**Obr. 5.22** Profil křídla se spoilerem ( $\alpha = -30^\circ$ , výchylka spoileru  $135^\circ$ )

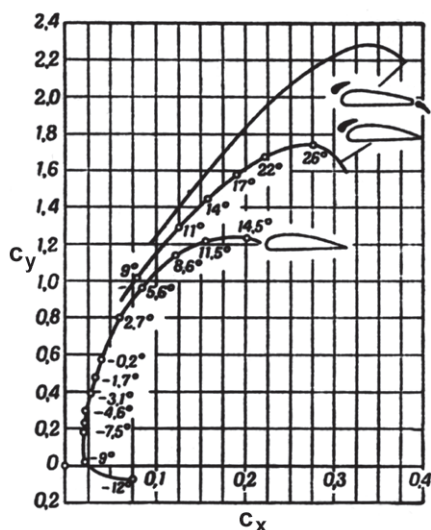


**Obr. 5.23** Profil křídla se spoilerem ( $\alpha = 30^\circ$ , výchylka spoileru  $135^\circ$ )

## 5.6 Výsuvný slot na náběžné hraně

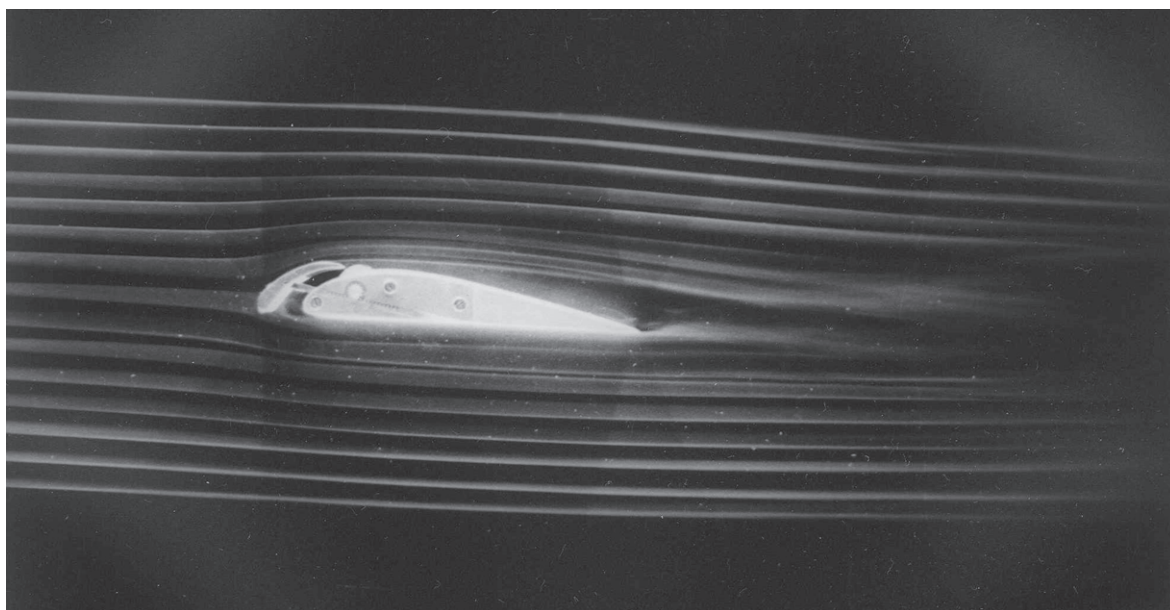
Dávají poněkud menší přírůstek vztlaku než klapky na odtokové hraně. Výsuvné sloty mohou být vysouvány buď pilotem pomocným řízením (často vázaným s vychylováním klapky na odtokové hraně, někdy i s křídélky pracujícími při přistání jako klapky). Druhý způsob je vysouvání automaticky silou vznikající v důsledku značného podtlaku na náběžné hraně při velkých úhlech náběhu.



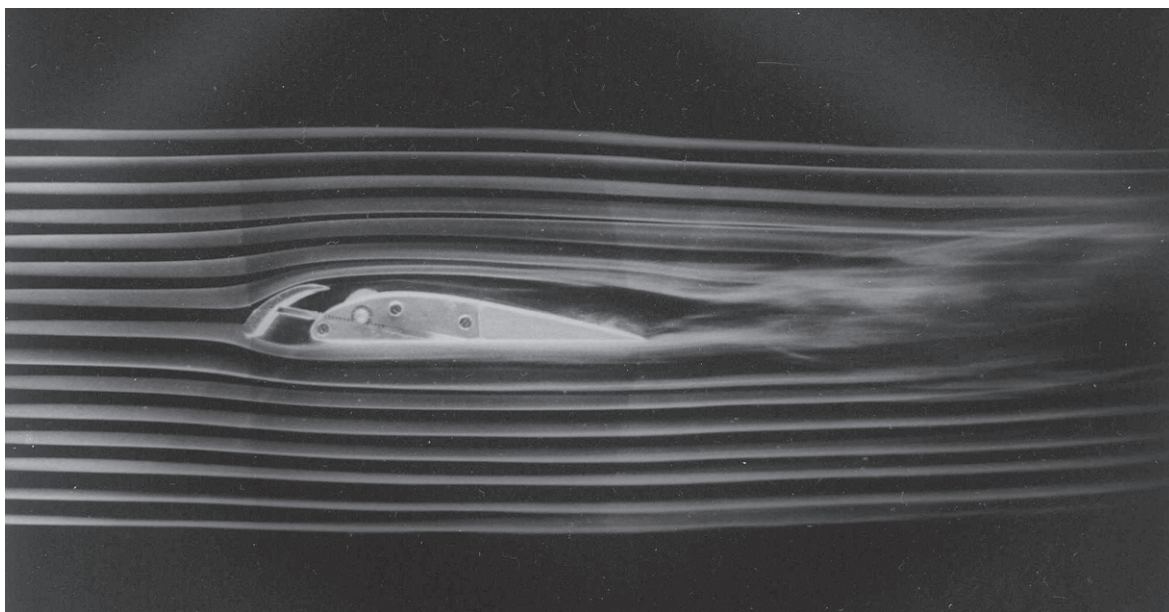


**Obr. 5.24** Závislost součinitele vztlaku  $c_y$  na součiniteli odporu  $c_x$ . Každému bodu poláry odpovídá určitý úhel náběhu  $\alpha$ .

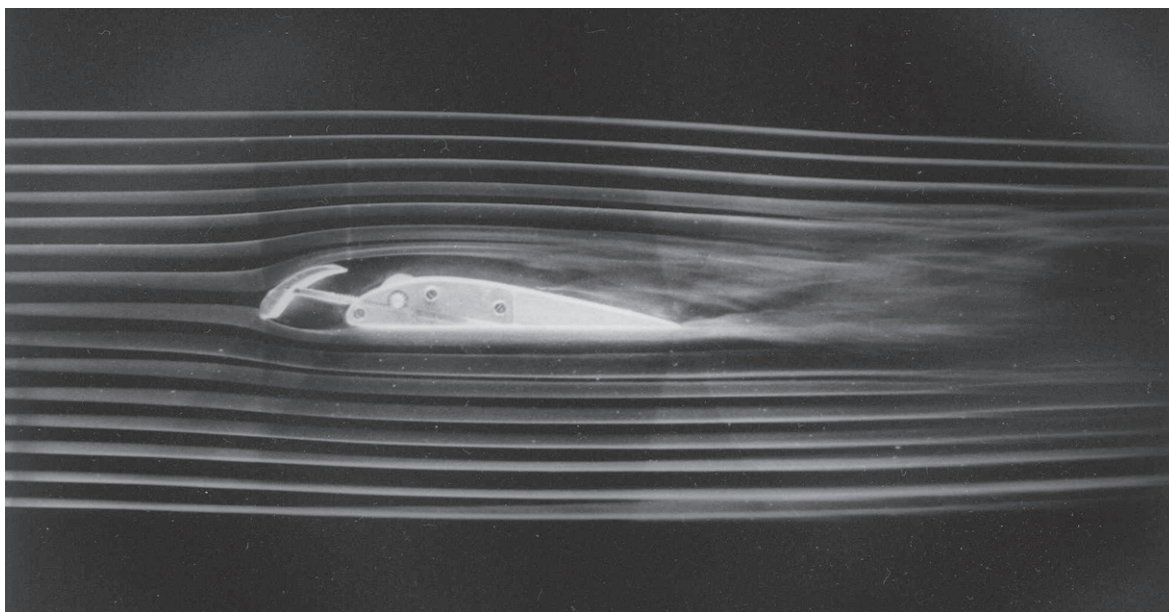
Při vysouvání náběžného slotu dochází ke zvětšení nosné plochy křídla, ale i k nárůstu odporu (obr. 5.25 - 5.27).



**Obr. 5.25** Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=0^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)

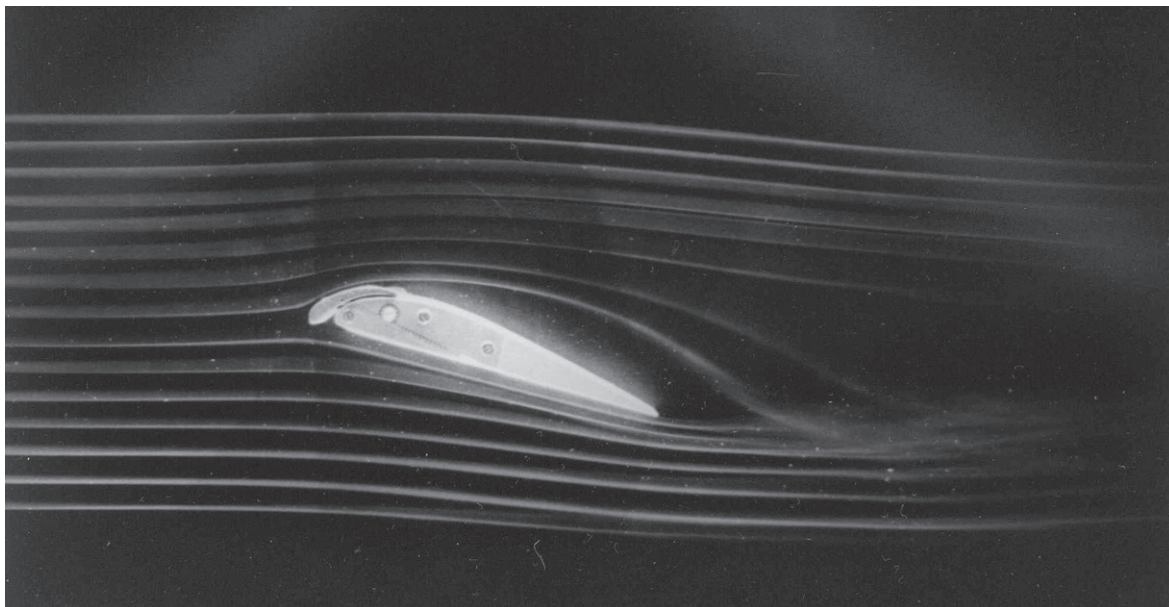


**Obr. 5.26** Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=0^\circ$ , vysunutí slotu 6 mm)

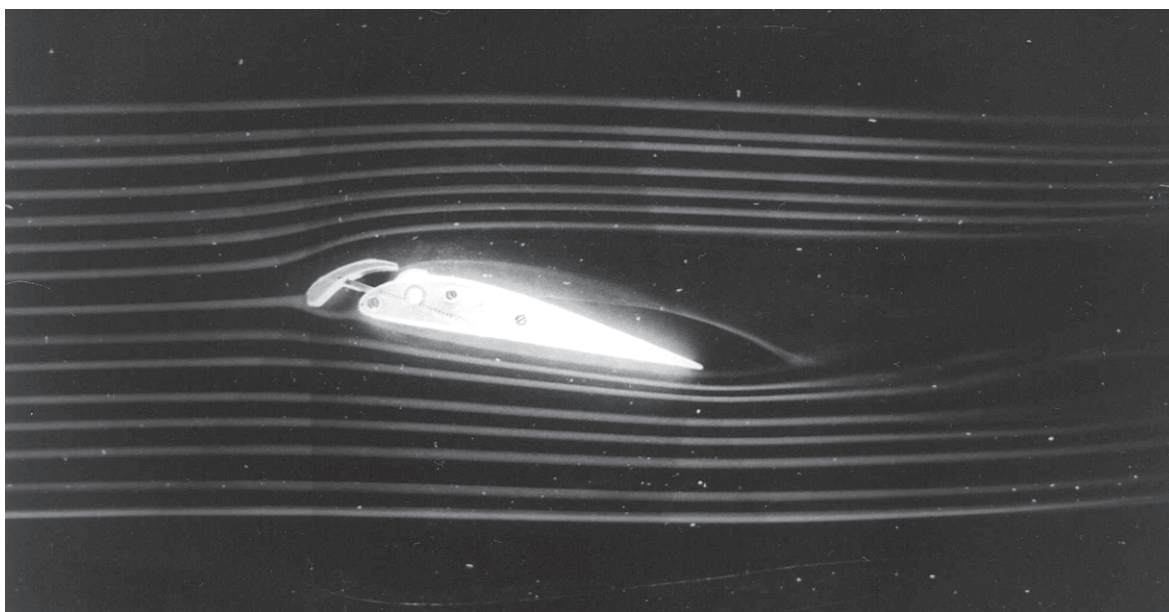


**Obr. 5.27** Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=0^\circ$ , vysunutí slotu 8 mm)

Vysouvání náběžného slotu (obr. 5.28)umožňuje profilu dosáhnout vyšší součinitele vztlaku beze změny tvaru profilu oproti (obr. 5.29).



*Obr. 5.28 Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=15^\circ$ , vysunutí slotu 0 mm)*

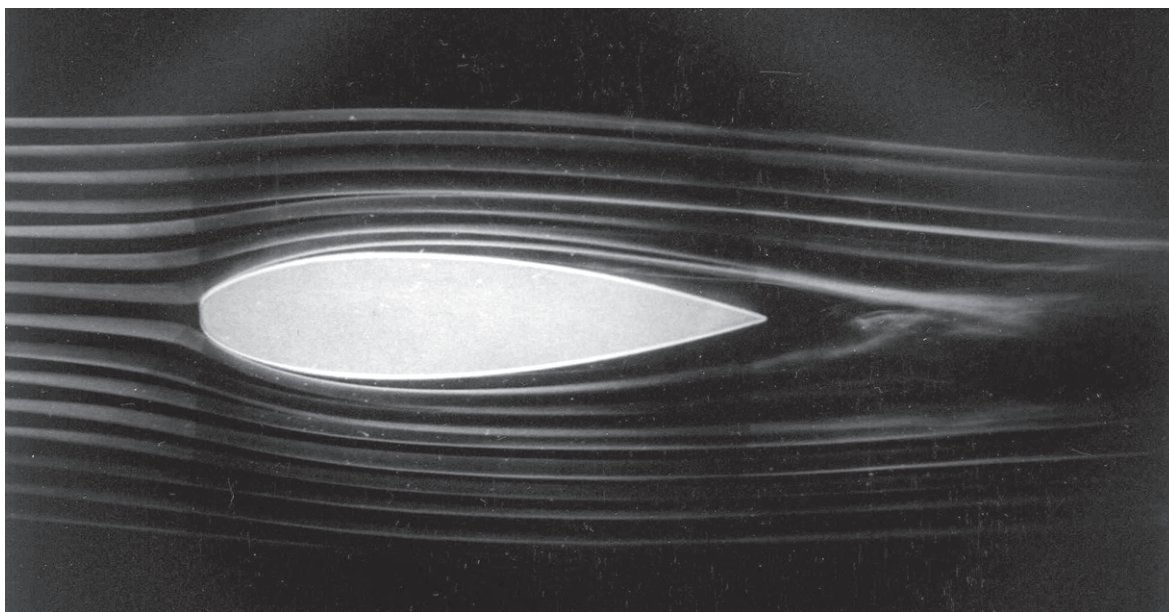


*Obr. 5.29 Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=15^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

## 5.7 Symetrický profil křídla

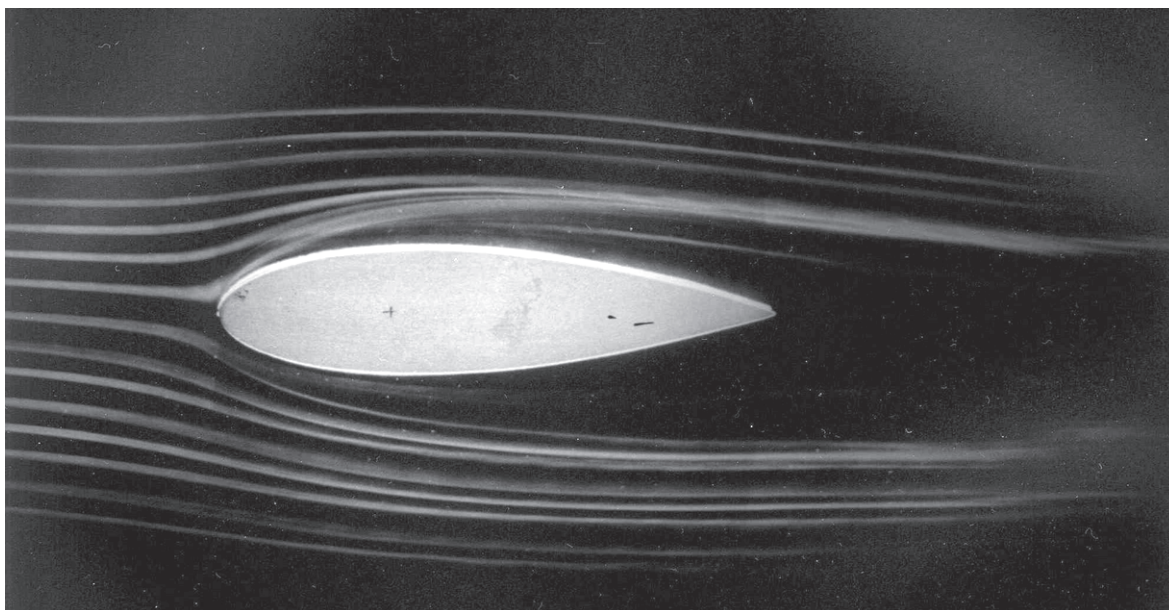
U symetrických profilů při úhlu náběhu  $0^\circ$  je rozložení tlaku po horní a dolní straně profilu navzájem symetrická a dává tak nulový vztlak, rovněž i úplav za profilem je symetrický (obr. 5.30).





**Obr. 5.30** Symetrický profil křídla ( $\alpha=0^\circ$ )

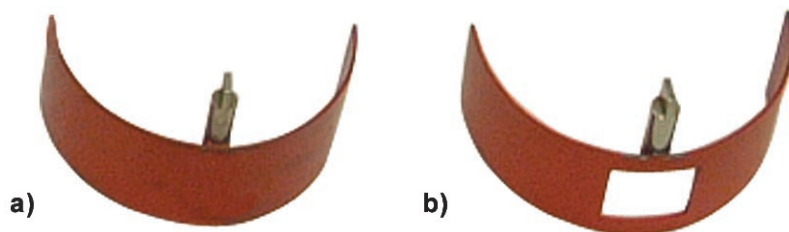
Na zdrsňené ploše profilu křídla (obr. 5.31) dochází k turbulizaci mezní vrstvy, v místě turbulizace dojde k přilnutí mezní vrstvy. Úplav za zdrsňenou plochou je nesymetrický vlivem zdrsňené plochy v horní části profilu.



**Obr. 5.31** Symetrický profil, zdrsňený povrch na horní straně křídla ( $\alpha=0^\circ$ )

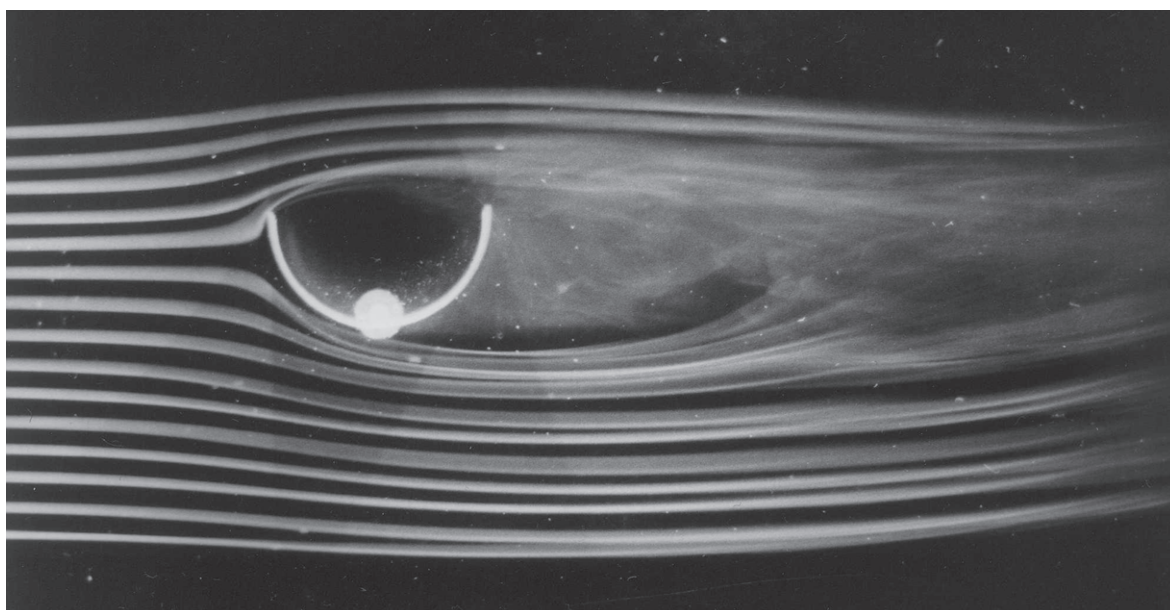
## 5.8 Profil tvaru "polovina dutého válce"

Jsou zde porovnány vždy dva obtékající profily, s otvorem a bez otvoru, s totožnou velikostí a tvarem při stejném natočení v kouřovém tunelu (obr.5.30).

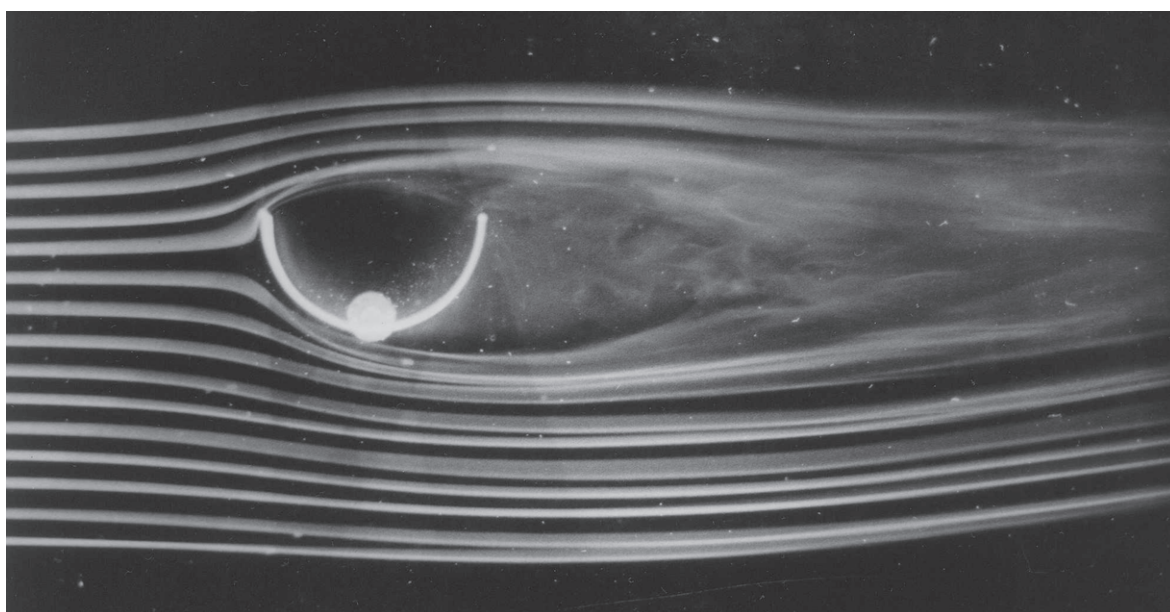


**Obr. 5.30** Profil: a) bez otvoru, b) s otvorem

Při tomto natočení (obr. 5.31 a 5.32) je obtékání nesymetrické podle podélné roviny, otvor na obtékání nemá vliv.



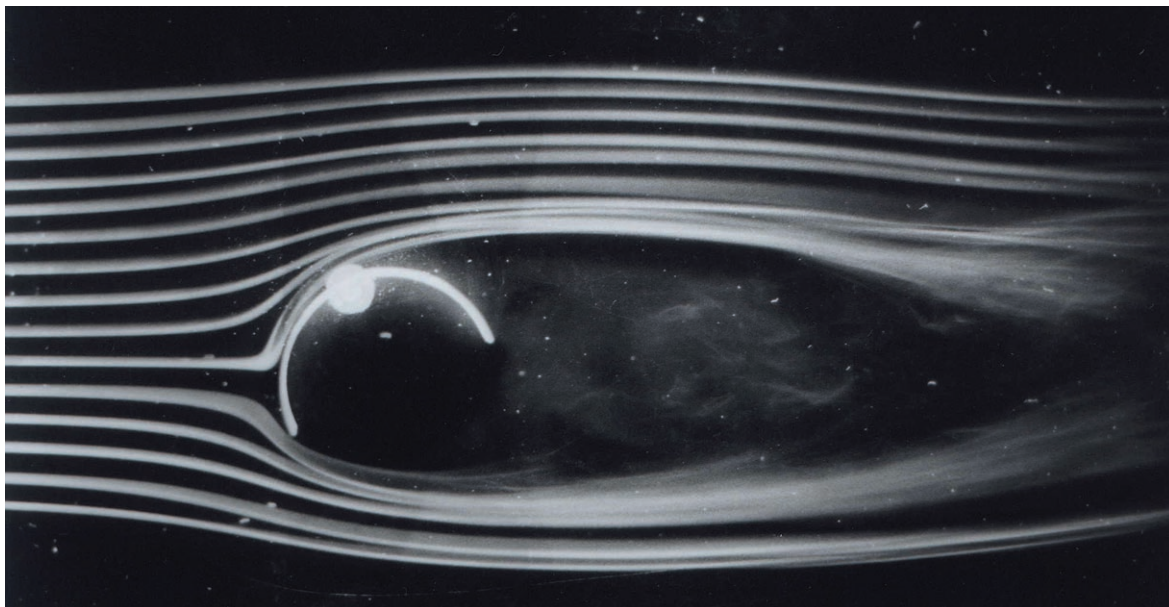
**Obr. 5.31** Profil bez otvoru



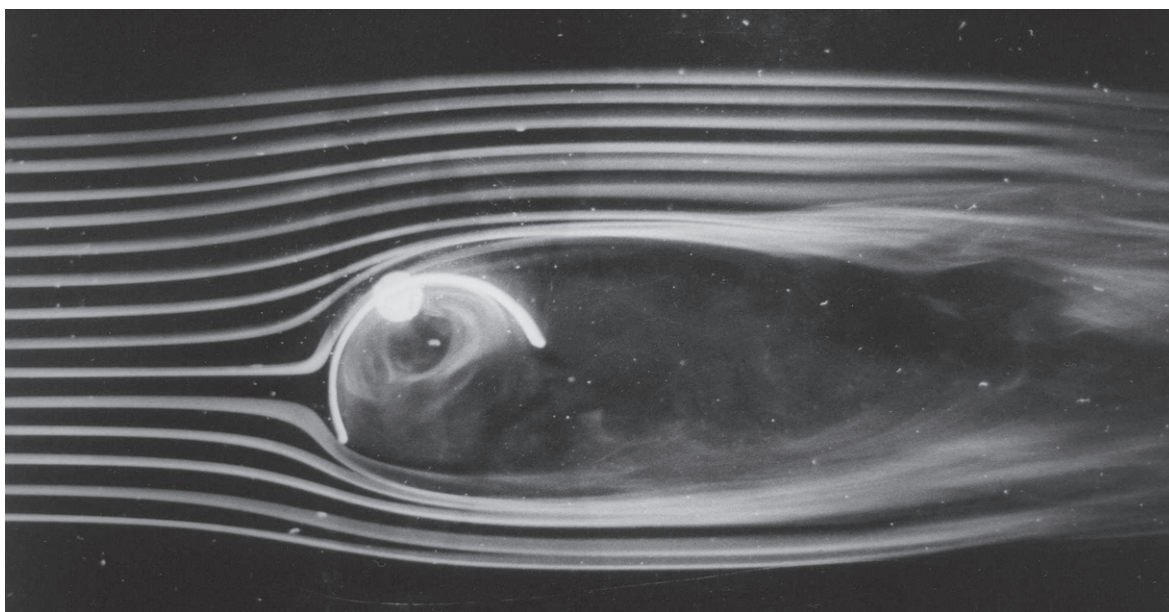
**Obr. 5.32** Profil s otvorem



Uvnitř profilu, který je s otvorem (obr. 5.34) dochází ke vzniku pomale cirkulujícího víru oproti (obr. 5.33). Tento jev nemá vliv na úplav.

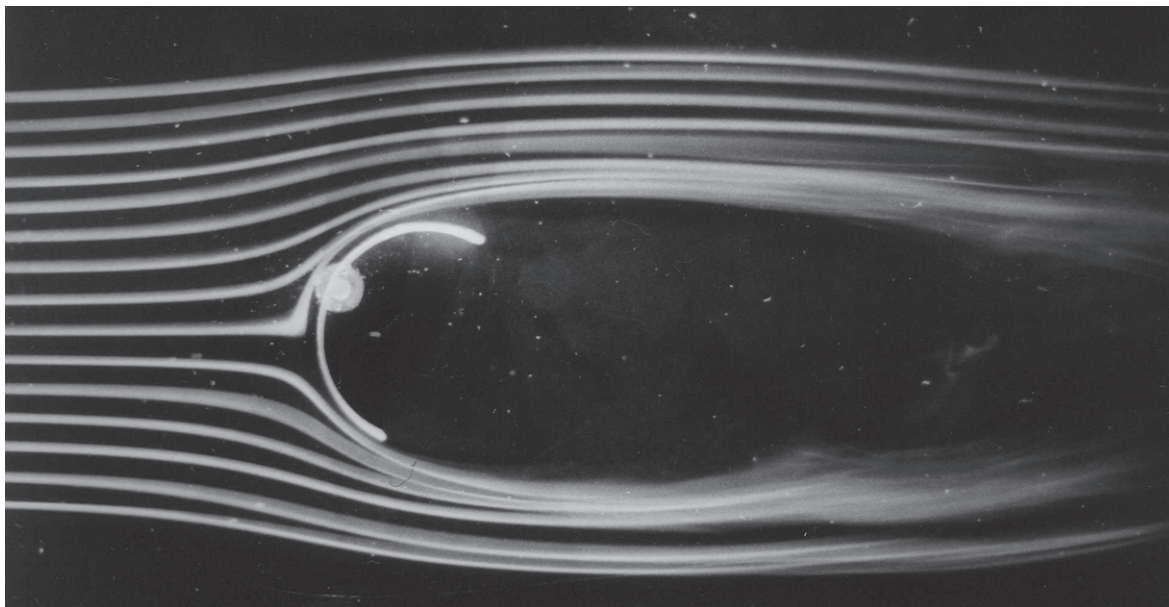


*Obr. 5.33 Profil bez otvoru*

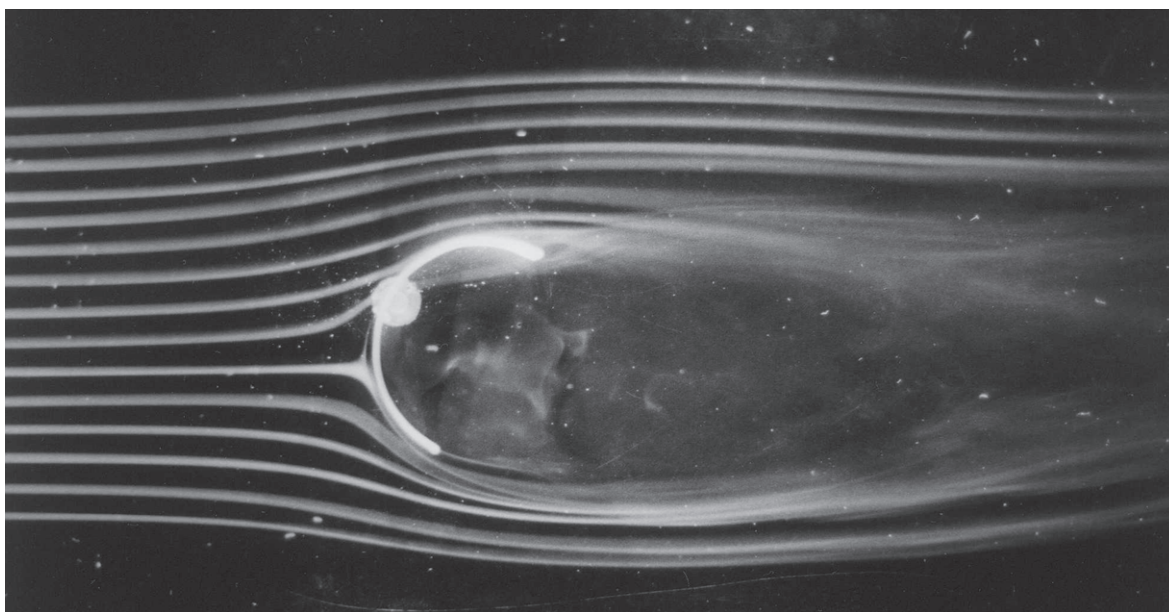


*Obr. 5.34 Profil s otvorem*

U profilu s otvorem (obr. 5.36) dochází ke snížení tlaku, vnější přetlak zdeformuje úplav a proudnice se k tomuto profilu přitlačí.



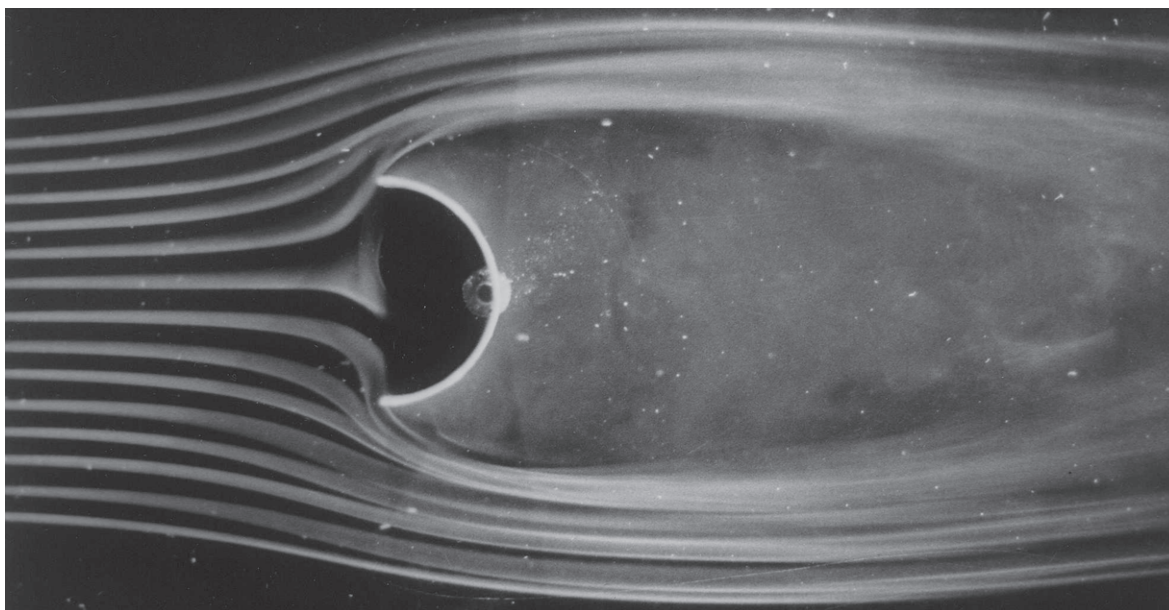
*Obr. 5.35 Profil bez otvoru*



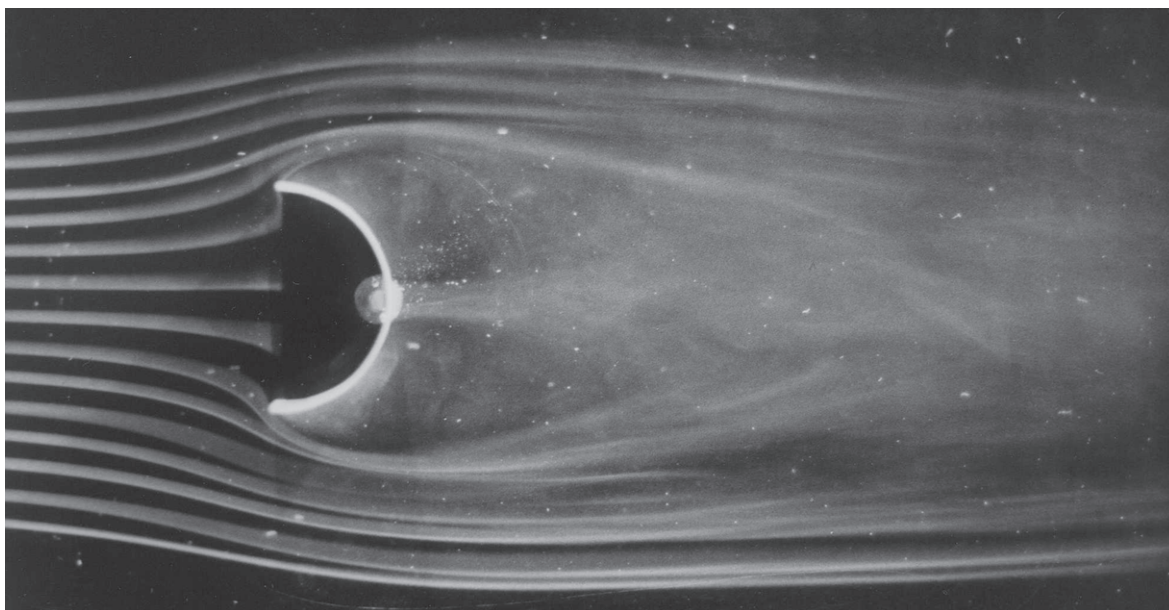
*Obr. 5.36 Profil s otvorem*



Zvýšení rychlosti v centru úplavu díky otvoru (obr. 5.38) způsobí, zmenšení plochy úplavu.



*Obr. 5.37 Profil bez otvoru*



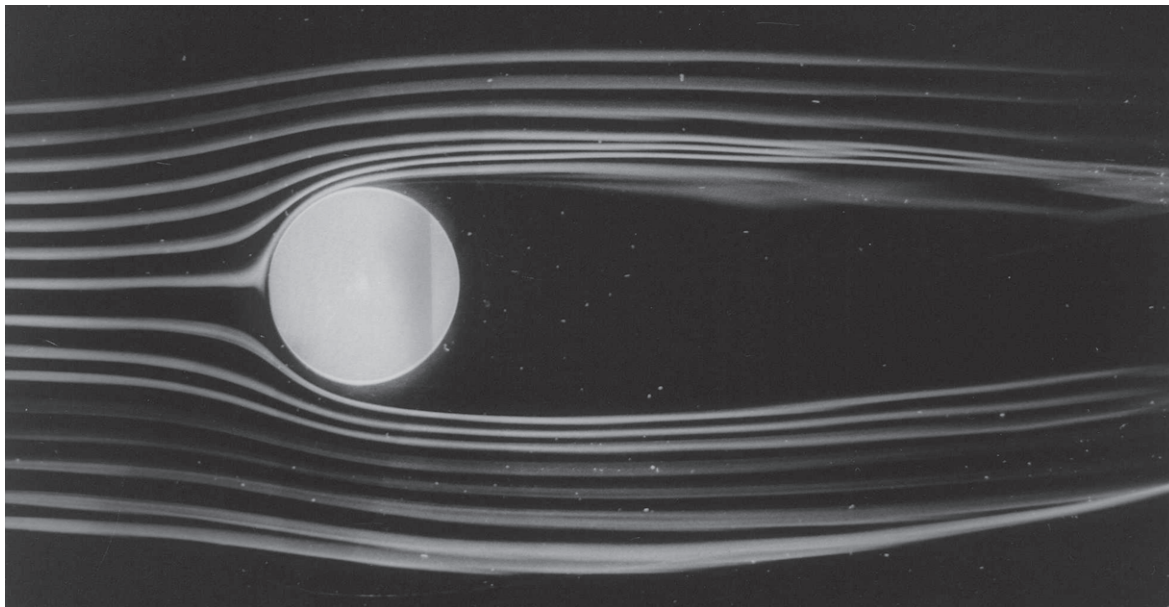
*Obr. 5.38 Profil s otvorem*



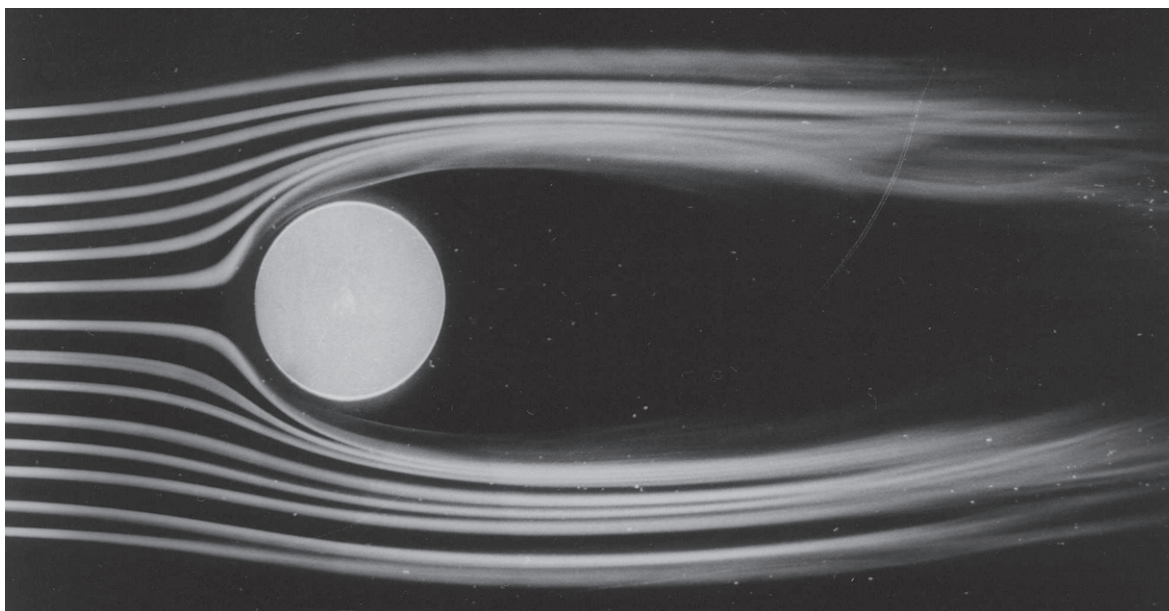
## 5.9 Válec

Při obtékání válce v laminárním proudění je bod odtržení mezní vrstvy ještě před max. průřezem tohoto válce, kdežto u turbulentního je místo odtržení již za tímto průřezem.

Typický příklad odtržení na válci s menším (obr. 5.39) a větším (obr. 5.40) Reynoldsovým číslem.



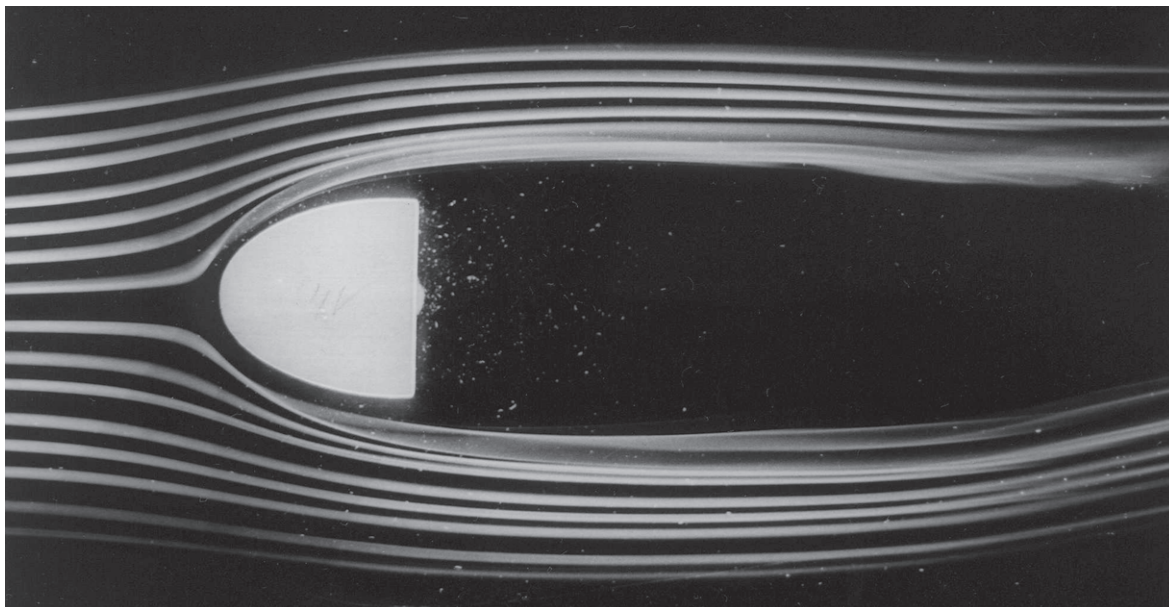
*Obr. 5.39 Válec,  $Re=980$*



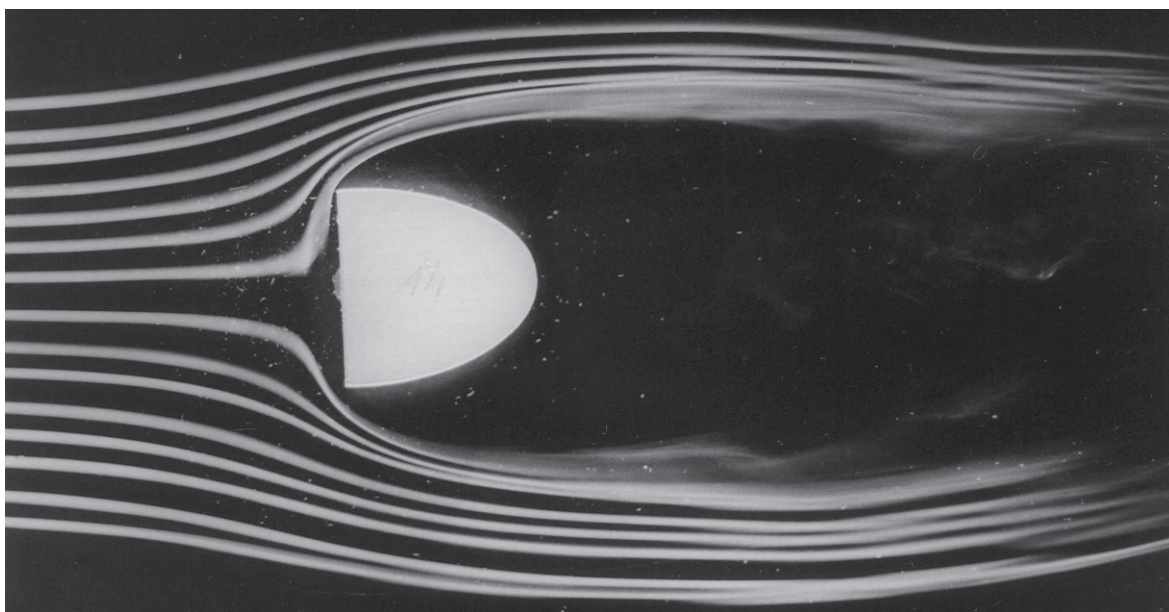
*Obr. 5.40 Válec,  $Re=1860$*

## 5.10 Profil tvaru "U"

Při obtékání dvou stejných symetrických profilů podle podélné osy otočených vzájemně o  $180^\circ$  je patrný symetrický úplav jiných rozměrů. Větší uplav je pozorovatelný na (obr. 5.42).



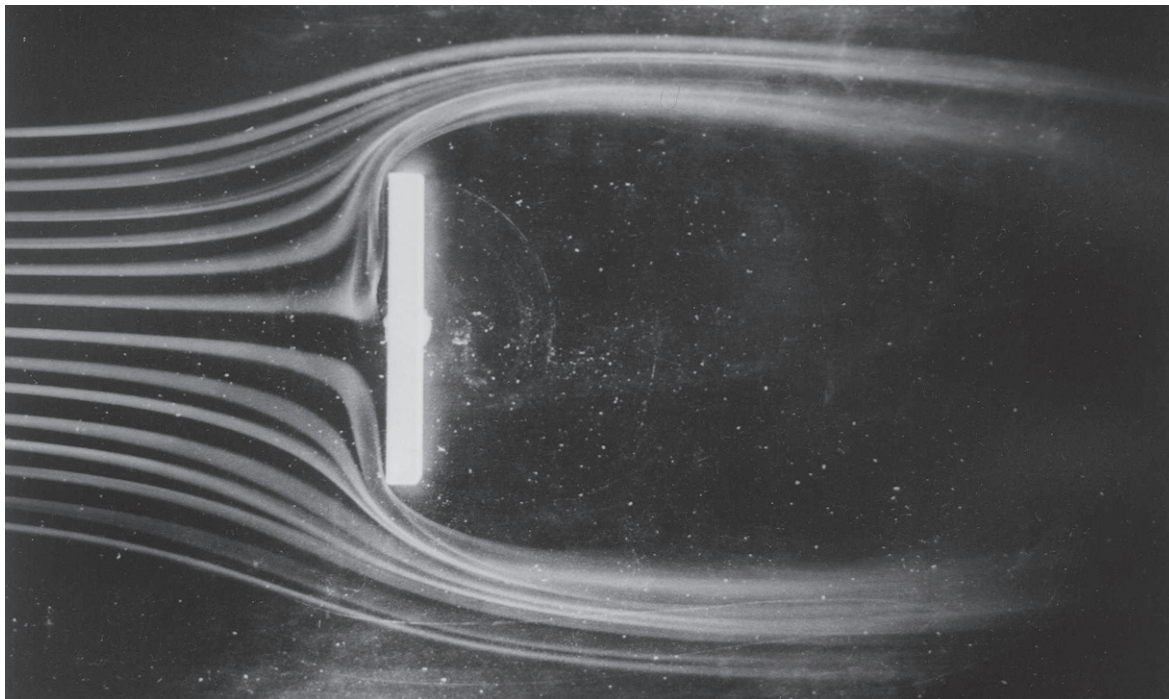
*Obr. 5.41 Profil tvaru "U"*



*Obr. 5.42 Profil tvaru "U"*

## 5.11 Deska

Typický příklad obtékání desky kolmé k proudu. Jde o znázornění dynamické síly ve směru proudu vzduchu (obr. 5.43).



*Obr. 5.43 Deska kolmá k proudu vzduchu*



## 6 DIGITÁLNÍ SYSTÉM SPEEDCAM+500

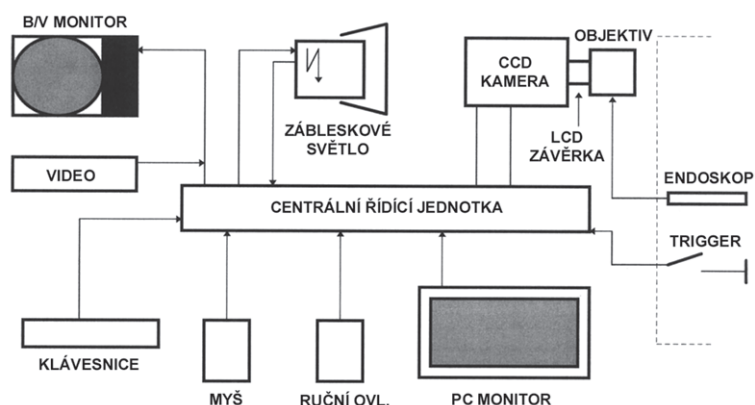
### 6.1 Použití rychlostní kamery pro analýzu obrazu a pohybu

Již dříve byla snaha sejmout a zaznamenat rychlé děje a procesy. K dispozici byly analogové systémy se záznamem na fotografický materiál a později systém rychlého videa, jež umožňovaly záznam a zpětné přehrávání pomalou rychlostí. Problémy s vyhodnocením záznamu vzhledem k jeho analogové formě byly zřejmé. Přechodně se objevily snahy o dodatečnou digitalizaci takto pořízeného záznamu, ale tento přístup značně snižoval rozlišovací schopnost záznamu. Navíc systémy neumožňovaly záznam pouze v okolí náhodně se vyskytující události, proto musel být záznam prováděn po dlouhou dobu, což vedlo k záznamu dlouhé nedůležité události.

Nově vyvíjené systémy se snaží tento nedostatek odstranit. Měřicí řetězec je tvořen rychlozáznamovou kamerou, A/D převodníkem, záznamové paměti a dalších řídicích a synchronizačních obvodů. Analogově digitální převodník je součástí digitální kamery, a nebo je v počítači jako vyhodnocovací PC deska.

Rozvoj dynamiky mechanických soustav a procesů vyžaduje i nové přístupy k jejich diagnostickému posuzování. V tomto smyslu se jeví použití rychlostního digitálního videa jako velmi výhodné, ne-li potřebné. Tento systém se stává užitečným při konstruování nových mechanismů strojů či pro posuzování a vyhodnocování interakcí mezi strojem a zpracovávaným materiálem. Aplikace takového systému je v průmyslu víc než potřebná. Moderní digitální systémy navíc bývají vybaveny i počítačovým softwarem pro analýzu obrazu a pohybu objektů v obraze. V tomto příspěvku bude představen systém rychlostního digitálního videa SPEEDCAM+500 švýcarské firmy Weinberger.

#### 6.1.1 Struktura a funkce digitálního systému speedcam+500



**Obr. 6.1** Schéma prvků rychlostní kamery

Systém rychlého digitálního videa zaznamenává pohyb vysokou rychlostí a ukládá jej v digitální formě do paměti kamery. Systém SpeedCam+500 je soubor řady komponentů, které jsou dodávány standardně se systémem a dále může být doplněn o další volitelné součásti dle specifikace uživatele (obr. 6.1). Základem systému je centrální počítačová jednotka, která řídí chod celého systému a je sestavena do podoby průmyslového PC pevné konstrukce. Ostatní komponenty dle schématu jsou běžné součásti klasického PC, tedy klávesnice, myš či počítačový monitor.

Klíčovou součástí celého systému je kamera s CCD snímačem. Tento snímač je komponován z 256x256 obrazových bodů. Plocha celého snímače je tedy zaplněna 65536 obrazovými prvky. Délka hrany CCD čipu je 4,096 mm. Řídící signály umožňují číst každý řádek či "přeskakovat" každý druhý či třetí a tím zvyšovat rychlost snímání děje. Bohužel však dochází k současnému snížení rozlišování detailů ve výsledném obraze. Přeskakování řádků je možné ve vertikálním směru. Činnost kamery je řízena řídící sběrnici. Výsledný video signál je digitalizován s rozlišením 8 bitů pomocí A/D převodníku. Při digitalizaci se užívá tzv. pixelové synchronizace, což znamená, že každému bodu CCD zobrazovače je přiřazen jeden byte kruhové paměti kamery.

Při snímání obrazu je snímací prvek vystaven působení světla po celou dobu přenosu obrazu, čímž může dojít k jeho "rozmazání" na monitoru. ( např. při snímací rychlosti 500 obr./sec. je doba "otevření zobrazovače" asi 2 ms). Zamezení rozmazání pohybu je zajištěno jednak pomocí LCD závěrky nebo použitím zábleskového světla. Zmíněná LCD závěrka je složena z tekutých krystalů, které při přivedení napětí nepropustí světlo, tím působí jako závora pro světelný tok. Její nevýhodou je drastické snížení světla přičemž nejkratší doba otevření závěrky je asi 160 mikrosekund. Při použití stroboskopického zábleskového světla, které je synchronizováno s rychlostí snímání kamery je doba záblesku pouze 20 mikrosekund a to zaručuje ostrý obraz po celou dobu snímání. Je však třeba nastavit vyšší clonová čísla na objektivu, aby se snížila intenzita světla dopadajícího na CCD zobrazovač a tím i snížit jeho integrovaný náboj.

Živý obraz z kamery je možné sledovat na černobílém monitoru s obyčejným CCIR signálem. Část plochy monitoru je využita na informace o nastavení systému, tj. např. poloha triggeru, rozlišovací schopnost kamery, nahrávací frekvence a mód kamery - nahrávání či live. Přehrávání záznamu je možné volitelnou rychlostí 200 až 1,5 obr./sec. Stejně tak je možné zapsat vymezenou část natočené sekvence prostřednictvím videorekordéru na VHS pásku. Jakoukoli zaznamenanou sekvenci, uloženou na hard disku, je možné kdykoliv takto přepsat na VHS pásku, která je určena pro jakoukoliv presentaci. Systém je vybaven dalšími řídicími vstupy a výstupy, které umožňují externí řízení celého systému včetně synchronizace s vnějšími událostmi (extsync, frame, stop). STOP ukončuje měření povelu od ručního ovládání kamery pokud je užito. Současně lze nastavit polohu triggeru "T", která určuje s jakým zpožděním od tohoto povelu bude snímání ukončeno. Systém je standardně předvolen v pěti stupních (tj. 0, 25, 50, 75 a 100%) události.

## 6.1.2 Program pro obsluhu sestavy speedcam+500

Alternativou pro ruční ovládání kamery je softwarový řídicí program. Tento uživatelský program je přehledný a snadný pro ovládání. Zajišťuje všechny funkce shodné s ručním ovládáním a je vybaven dalšími možnostmi v ovládání videosystému včetně pohodlného ukládání sekvencí na disk počítače. To souvisí i s tím, že jsou často ukládány pouze velmi krátké časové úseky natočené sekvence (milisek), které je možné tímto programem snadno vybírat a ukládat. Sekvence je možné kdykoliv prohlédnout jak na přídavném monitoru, tak na monitoru PC povelom ShowFile. Program umožňuje celou řadu nastavení parametrů kamery včetně její plynulé rychlosti snímání a mnoho dalších funkcí (tab. 6.2).

Ukládání obrazových dat je organizováno do struktury, jejímž nejvyšším prvkem je tzv. Projekt. Program automaticky vytvoří adresář s tímto jménem a jednotlivé soubory v něm postupně čísluje. Jméno souboru je samozřejmě možné libovolně zadat. Program automaticky vytváří tři soubory ke každé natočené sekvenci, přičemž soubory s koncovkou BLD jsou obrazové, DSC obsahuje informace o parametrech natočené sekvence, TXC soubor naopak slouží pro individuální poznámky uživatele kamery.

ROZLIŠENÍ	256x256	256x128	256x64	256x32
max. rychlost (snímky)	530	1026	1926	3429
počet snímků	4096	8192	16384	32768
Doba měření (sec)	7,7	7,9	8,5	8,9

**Tab. 6.2** Tabulka snímacích rychlostí kamery SpeedCam+500 v závislosti na rozlišení detailů v obraze

## 6.1.3 Program pro analýzu pohybu objektu

Tento program je volitelným přídatkem k systému rychlého digitálního videa SpeedCam+500. Software je možné provozovat na libovolném počítači s procesorem 386 nebo lepším v prostředí DOS. Tento program je určen pro automatickou analýzu vysokorychlostních pohybů zaznamenaných videem. Tento systém je rovněž produktem švýcarské firmy Weinberger.

Program ANALYZE umožňuje komfortním způsobem analyzovat pohyb až deseti různých objektů v jednom obraze. To znamená, že můžeme sledovat například deset významných bodů na „rozběhnutém“ mechanismu. Sledování objektu je prováděno metodami vyvinutými speciálně pro tento účel, které mají zaručenou sub-pixelovou přesnost. Umístění detekčních bodů je možné v rámci sekvence ručně opravovat. Rychlost sejmutí obrazu musí být vždy v souladu s frekvencí pohybu objektu, aby výsledný zpomalený pohyb na monitoru byl spojitý a výsledná křivka (např. dráhy objektu) byla plynulá.

Výsledkem analýzy jsou zjištěné základní kinematické veličiny bodu na objektu, jako je dráha, rychlost a zrychlení. Definováním určitých podmínek mezi objekty lze zjišťovat i úhlovou dráhu, rychlost a zrychlení. Pro všechny vybrané objekty jsou tedy přesně určené souřadnice  $x, y$  v ekvidistantních časových krocích  $\Delta t$  daných převrácenou hodnotou frekvence vzorkování.

Program **ANALYZE** je koncipován do čtyř základních menu takto:

**File I/O:** nabídka slouží k vybrání požadovaného souboru obrazových dat určených pro analytické zpracování a také dat o definovaných souborech.

**Edit:** tato nabídka slouží k nastavení algoritmů pro sledování objektů v obraze, vlastní sledování asi na 3/4 plochy PC monitoru a samozřejmě také umožňuje vlastní označení objektů v obraze pomocí barevných bodů umístěvaných pohyblivým nitřním křížem pomocí PC myši. Toto nastavení je vhodné provést již v prvním obraze sekvence a současně je možné rozhodnout o automatickém, poloautomatickém či plně manuálním způsobu "tažení" bodů na objektu. Jednotlivé body je možné dodatečně propojit pomocí spojovací matice a provést závěrečnou animaci celého pohybu v menu **ANALYZE**.

**Analyze:** vlastní algoritmus pro provádění analýzy sekvence vybraných objektů. Toto menu je složeno ze dvou oken z nichž větší obsahuje časový průběh sledovaných objektů a to jak v ose  $x$  tak  $y$ . Pro všechny body je možné zobrazit  $x \ x' \ x'' \ y \ y' \ y''$  a také  $\beta \ \beta' \ \beta''$ . Úhel  $\beta$  je nutné definovat čtyřmi body na objektu. Výpočet derivací je prováděn inteligentním postupem, avšak nepřesné umístění bodů na objektu nebo dokonce kvantizační šum způsobuje zkreslení ve formě ostrých hran. Při výpočtu derivací je užíváno filtrace modifikovaným Savitzského - Galazovým filtrem s proměnným konvolučním jádrem.

**Image Process:** umožňuje pomocí vybraných filtrů provádět analýzu obrazu. K dispozici jsou standardně předvolené filtry - nízkofrekvenční, vysokofrekvenční, kontrast, eroze, medián, dilatace, Sobelův filtr. Dále je možné volit vlastní filtrační matici. Všechny filtry mohou být aplikovány jedno nebo dvou dimenzionálně v  $(x, y)$ . Souřadnice bodů získané analýzou pohybu objektů je možné uložit do formátu ASCII. Takovýto soubor je možné číst libovolným textovým editorem, či jinak importovat a zpracovávat (např. programem EXCEL). Součástí je i program pro konverzi naměřených dat. Stejně tak je možné tisknout jednotlivé obrázky natočené sekvence. Je však nejprve nutné provést konverzi do formátu TIF. Pro úspěšné provedení analýzy je nutné, aby sledovaný děj probíhal v celé ploše PC monitoru. Toho je možné dosáhnout použitím vhodné optiky pro vlastní snímání obrazu.

## 6.2 Aplikace speedcam+500 na proudové pole v kouřovém tunelu

Pro vizualizaci smykových oblastí - zón byla použita rychlokamera s digitálním systémem SPEEDCAM+500 švýcarské firmy Weinberger. Rychlost snímání 100 snímku/s při rozlišení

256x256 pixelů.

Pro představu: natočení 2 sekundové sekvence v reálném čase zabírá 65MB paměti na hard disku. Protože nebyl k dispozici v přijatelné cenové relaci program pro kompresi požadovaného videa, který umí spolupracovat se zakódovanými soubory švýcarské firmy, byl jsem nucen 10 sekundové sekvence nahrávat vzápětí na video. Pomocí video karty v počítači bylo video z VHS kazety opět přeneseno do počítače, zde upraveno a sestříháno.

Je zřejmé, že při transformaci přes analogový převodník (z PC do videa a opět do PC) došlo k výrazné ztrátě kvality.

Záznam z rychlokamery je uveden na přiloženém CD nosiči.



## 7 OPTIMALIZACE KOUŘOVÉHO TUNELU

### 7.1 Úprava napájení topné spirály

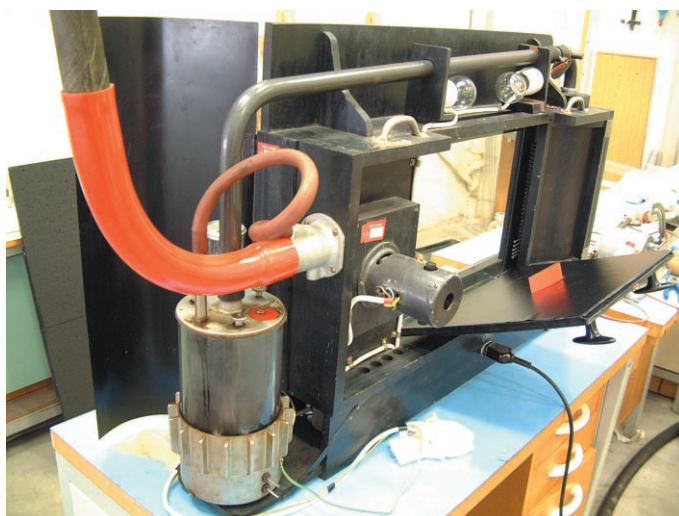
Pro lepší funkčnost měření byly upraveny některé části tunelu. Zejména generátor kouře, který byl původně výrobcem navrhnutý pro zapojení do elektrické sítě na 230V/50Hz. Při tomto napětí docházelo k častému přehřátí topné spirály, proto byla spirála připojena přes autotransformátor (obr. 7.1). Optimální napětí pro topnou spirálu bylo experimentem zjištěno 90V.



*Obr. 7.1 Transformátor*

### 7.2 Odvod kouře

Také muselo být vyřešeno odvádění výstupního kouře z tunelu (obr. 7.2). Na výstupní hrdlo byla nasunuta další soustava trubek (první ve tvaru kolena) a tak mohl být kouř odveden ventilací z měřené místnosti.



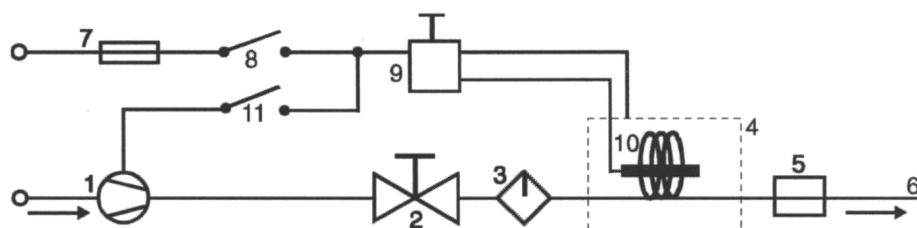
*Obr. 7.2 Kouřový tunel, odvod kouře ventilací*

## 7.3 Generátor kouře

Generátor, který je standardně součástí tunelu a na kterém proběhlo celé měření je již velmi zastaralý. Odpařováním a spalováním oleje nezíská aerosol tak vysoké koncentrace a tak výhodných optických vlastností. V dnešní době se již používají moderní generátory kouře.

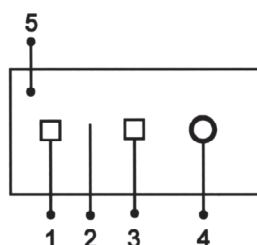
### 7.3.1 Generátor kouře SPTechnics

Přenosný generátor kouře SPTechnics (obr. 7.3) je vhodný pro vizualizaci pohybu vzduchu v budovách, ale také pro generování částic pro LDA a PIV metodu. Tímto generátorem je produkován netoxický kouř založený na parafínovém oleji, který dosahuje v okamžiku opuštění náhubku pokojové teploty. Množství kouře může být regulováno jehlovým ventilem nebo výměnou tří náhubků přiložených ke generátoru. Kontrolní jednotka umožňuje sledovat pohyb vzduchu na dálku.



**Obr. 7.3** Blokový diagram SPT generátoru kouře (1-kompresor, 2-jehlový ventil, 3-mlhová komora, 4-výhřevný element, 5-kondenzační komora, 6-výstup kouře do roury s různými náhubky, 7-pojistka 220V/6.3A, 8-spínač, 9-termostat s kontrolní žárovkou, 10-teplotní kontrolní čidlo, 11-spínač kompresoru)

Generátor kouře se lehce ovládá. Je připojen k síti 230V. Spínačem 8 zapínáme vyhřívací element. Konečná teplota je dosažena za několik minut, což je signalizováno žárovkou "Ready" s nápisem na přední jednotce (obr. 7.4).



**Obr. 7.4** Rozmístění kontrolního panelu na hlavní jednotce SPT generátoru kouře (1-vyhřívací element popsaný "Temp", 2-kontrolní lampy označené "Ready", 3-kompresorový spínač označen "Pump", 4-indikátor jehlového ventilu, 5-pojistka označená 6.3A)

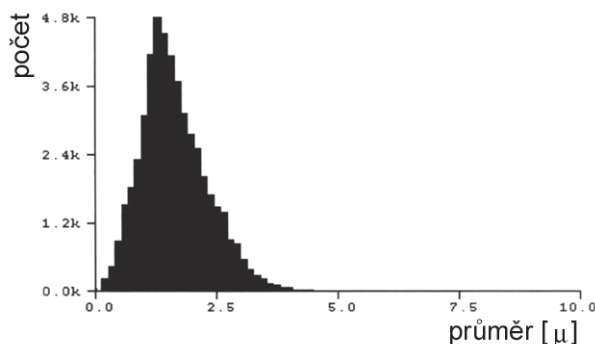
Teplotní senzor napojený na termostat udržuje vnitřní teplotu na konstantní hladině. Jakmile teplotní element v kouřovém tunelu dosáhne své konečné teploty kompresor 1 může být zapnut pomocí tlačítka 11. Vzduch od kompresoru je veden do mlhové komory 3, kde je nasycen olejovými částicemi. Částice se pohybují kolem výhřevného elementu, kde jsou přeměněny na kouř a rovnoměrně smíšeny s nosným vzduchem.

Velké částice, které nejsou přeměněny v kouř jsou separovány v kondenzační komoře 5. Kouř, který opouští výstupní trysku 6 v zadní části výstupní jednotky je relativně zbavený oleje a dosáhne pokoj teploty, jakmile se dostává ke konci náhubku.

### Technické údaje

Dodávka vzduchu	max. 1,5 m <sup>3</sup> /h	
Kompresor	vestavěn	
Zdroj	240V	
Pojistka	240V/6,3A	
Rozměry	440x230x210 mm	
Hmotnost	8 kg	
Doporučený olej	Typ:	parafín
	Druh:	Ondina 15
	Refraktivní index:	1,468
	Výrobce:	Shell

Rozměr částic je 1,5  $\mu\text{m}$ . Kouř neobsahuje částice s průměrem větším jak 5  $\mu\text{m}$ , což zajišťuje prostupnost částic kouře při vysokých turbulentních proudech. Rozložení částic ukazuje histogram (graf. 7.5).



**Graf. 7.5** Histogram SPT generátoru

### 7.3.2 Generátor kouře SAFEX

Generování mlhy je vytvářeno chemickou a fyzikální reakcí vypařované tekutiny v oblasti mezi 10 cm před výstupem mlhy. Vzhled generátoru (obr. 7.6).



**Obr. 7.6** Generátor kouře - SAFEX

Je možné použít dva režimy generování mlhy.

#### 1. Krátkodobý vývoj kouře

Během zahřívacího času (6-8 min.) výměník tepla nahromadí velké množství energie, která může být uvolněna ve velmi krátkém čase (1,5-2 min.) pro výrobu mlhy, takže pro generování mlhy může během krátkého času dopravit více energie než může vyvinout připojení k síti.

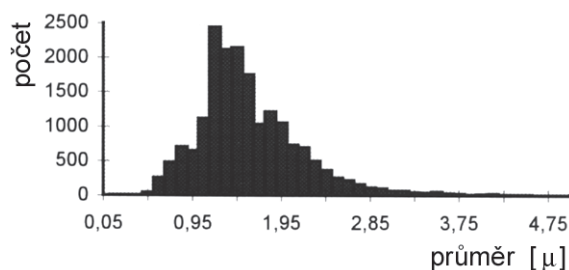
#### 2. Dlouhodobý vývoj kouře

Tento způsob je doporučován, jestliže je požadováno velké množství mlhy. K dosažení kontinuálního vývoje mlhy během dlouhých period má být nastaven vyvíječ na 70% maxima.

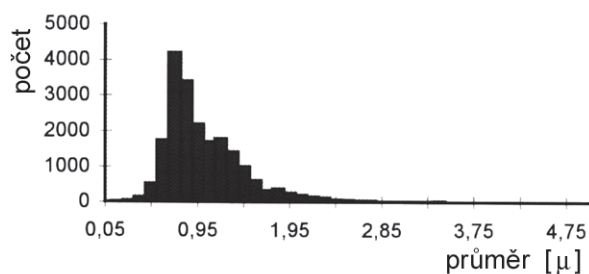
Typ kapaliny	Provoz mlhy
Blitz	5-10 min.
Standard	10-30 min.
Super	30-60 min.

Ceny kapalin se pohybují okolo 150 USD/5 litrů.

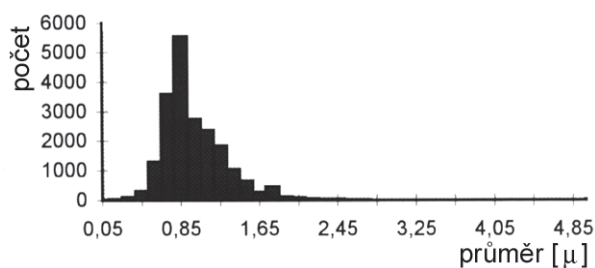
Histogram pro jednotlivé kapaliny (Graf. 7.7-7.9)



**Graf. 7.7** Histogram generátoru SAFEX - typ Blitz



**Graf. 7.8** Histogram generátoru SAFEX - typ Standard



**Graf. 7.9** Histogram generátoru SAFEX - typ Super

## 1. Generátor FOG 2010

### Technické údaje

Napětí	220/230 V/50 Hz nebo 110 V/60 Hz
Spotřeba	1500 W
Pojistka	8 A
Čas ohřevu	5 min.
Kapacita nádoby	300 ml
Fyzická velikost	340x170x145
Váha	6,5 kg
Spotřeba kapaliny	Min.: 10 ml Max.: 85 ml
Generování mlhy	600 m <sup>3</sup> /min

Příslušenství 3 m přívodní kabel, držák nádrže, nádrž se sací hadicí a filtrem.

Cena se pohybuje okolo 1800 USD.

## 2. Generátor FOG 2004

Napětí	220/230 V/50 Hz
Spotřeba	1500 W
Pojistka	8A
Čas ohřevu	5 min.
Kapacita nádoby	300 ml

Fyzická velikost	340x170x145
Váha	5,1 kg
Spotřeba kapaliny	Min.: 5 ml Max.: 60 ml
Generování mlhy	600 m <sup>3</sup> /min

Příslušenství 3 m přívodní kabel, držák nádrže, nádrž se sací hadicí a filtrem.

### 3. Generátor FOG 2005-LOOP

Napětí	220/230 V/50 Hz
Spotřeba	1500 W
Pojistka	8A
Čas ohřevu	5 min.
Kapacita nádoby	300 ml
Fyzická velikost	340x170x145
Váha	6,5 kg
Spotřeba kapaliny	Min.: 2 ml Max.: 19 ml
Generování mlhy	130 m <sup>3</sup> /min

Příslušenství 3 m přívodní kabel, držák nádrže, nádrž se sací hadicí a filtrem.

Cena se pohybuje okolo 1900 USD.

Výběr a zakoupení vhodného kouřového generátoru je třeba ještě probrat s dodáváním výrobcem a nechat se informovat od odborníků, kteří tyto generátory již ve své praxi používají.

## 8 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

V kouřovém tunelu byly provedeny vizualizační experimenty na vybraných modelech. Vizualizované smykové oblasti jsou vyfotografovány a jejich podrobný popis je uveden u každé z nich.

Tunel slouží k rychlému získání kvalitativních výsledků a dává představu o struktuře sledovaného jevu. Jde o lacinou metodu ve srovnání s PIV metodou, která to kvantifikuje v jiných cenových relacích.

Zkvalitnění tunelu je možné použitím moderního kouřového generátoru částic oproti dosavadnímu, který nebyl schopen vyrobit aerosol tak vysoké koncentrace s výhodnými vlastnostmi pro optické zobrazení. Přehled a parametry generátorů, jsou uvedeny v jedné z kapitol.

Pro zpracování nové práce bych uvedl některé úvahy: použít nové modely jako je např. spoiler automobilu; vizualizaci již s moderním generátorem částic, na který byl proveden v této práci návrh; použít barevných kouřových vláken.

Bakalářská práce byla zpracována tak, aby čtenáři poskytla přehled o jednotlivých metodách a získání obrazu proudového pole zejména kolem leteckých profilů.

Tato práce může být použita jako výuková pomůcka (např. v předmětu Mechanika Tekutin), zvláště při názorném seznamování studentu se základními obrazci při obtékání.

Podařilo se zaznamenat digitální rychlokamerou (video je přiloženo na CD nosiči) nestacionární režimy kolem obtékaných modelů, což lze poznamenat za originální dílo.

## 9 LITERATURA

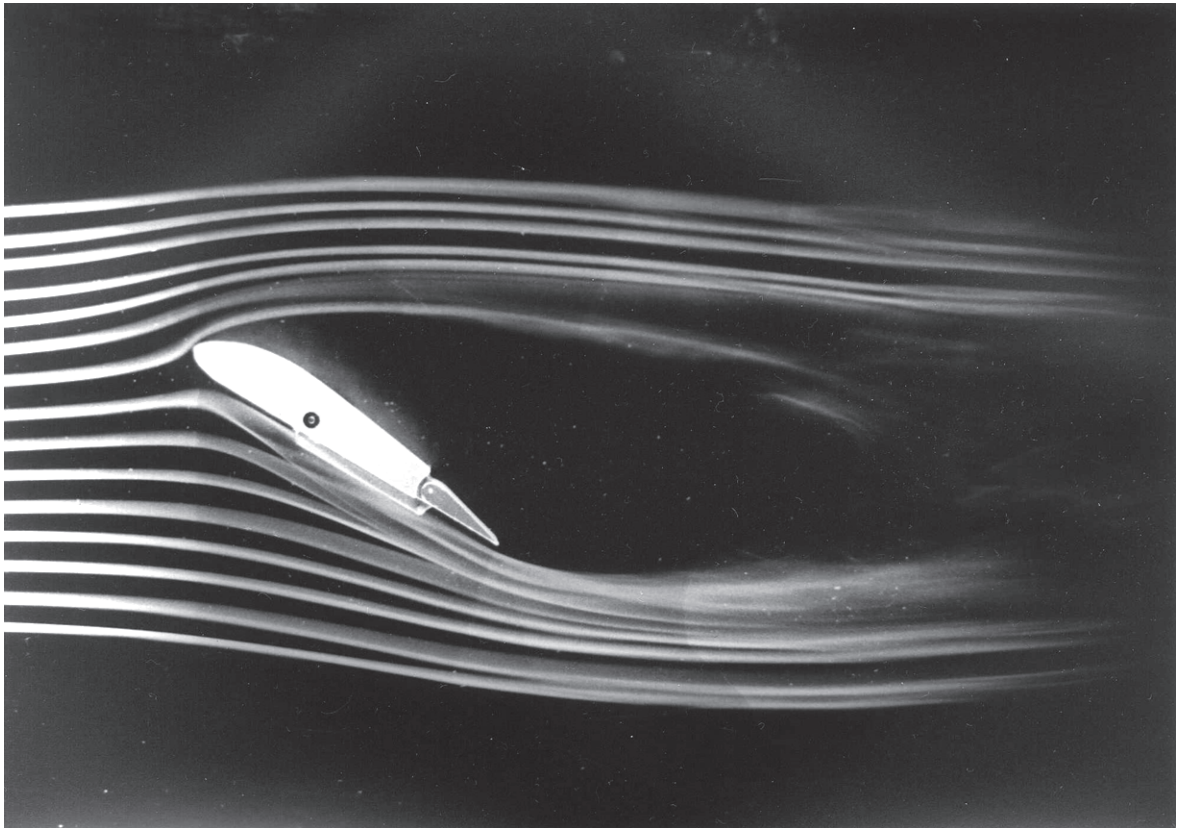
- [1] Řezníček, R.: Visualisace proudění, Academia, Praha 1972.
- [2] Sequens, J.: Technika zobrazení fyzikálních polí, Academia, Praha 1980.
- [3] Merzkirck, W.: Flow visualization, Academic Press, New York 1974.
- [4] Horák, Z., Krupka, Z.: Fyzika-Příručka pro vysoké školy technického směru-  
svazek II, SNTL/ALFA, Praha 1976.
- [5] Kuneš, J., Vavroch, O., Franta, V.: Základy modelování, SNTL, Praha 1989.
- [6] Dvořák, R., Kozel, K.: Matematické modelování v aerodynamice, ČVUT Praha 1996.
- [7] Tesař, V.: Mezní vrstvy a turbulence, ČVUT Praha 1996.
- [8] Pícha, B.: Aerodynamika nízkých a vysokých rychlostí, Vysoká škola strojní a textilní  
v Liberci, Liberec 1987.
- [9] Brož, V.: Aerodynamika nízkých rychlostí, ČVUT Praha 1977
- [10] <http://www.dantecmt.com> (FlowManager software in FlowMap® PIV systems)



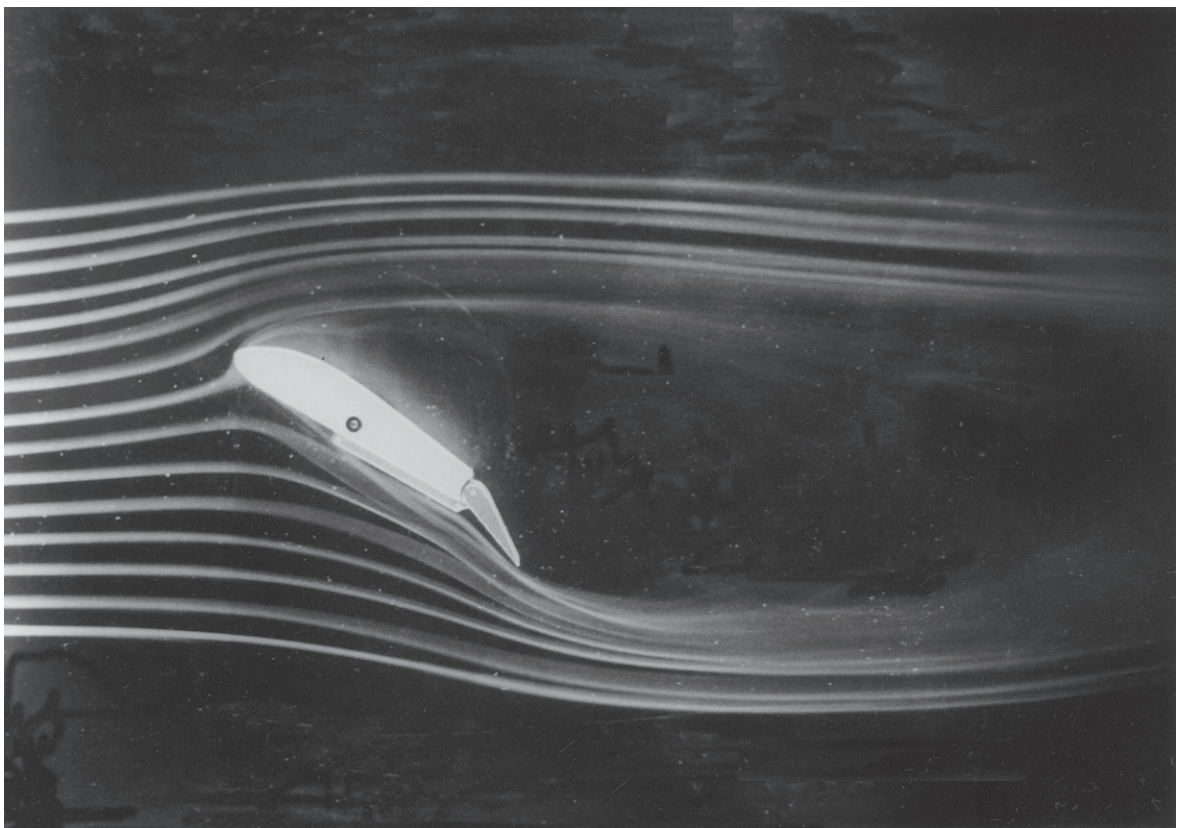
# **PŘÍLOHY**

## **PŘÍLOHA I**

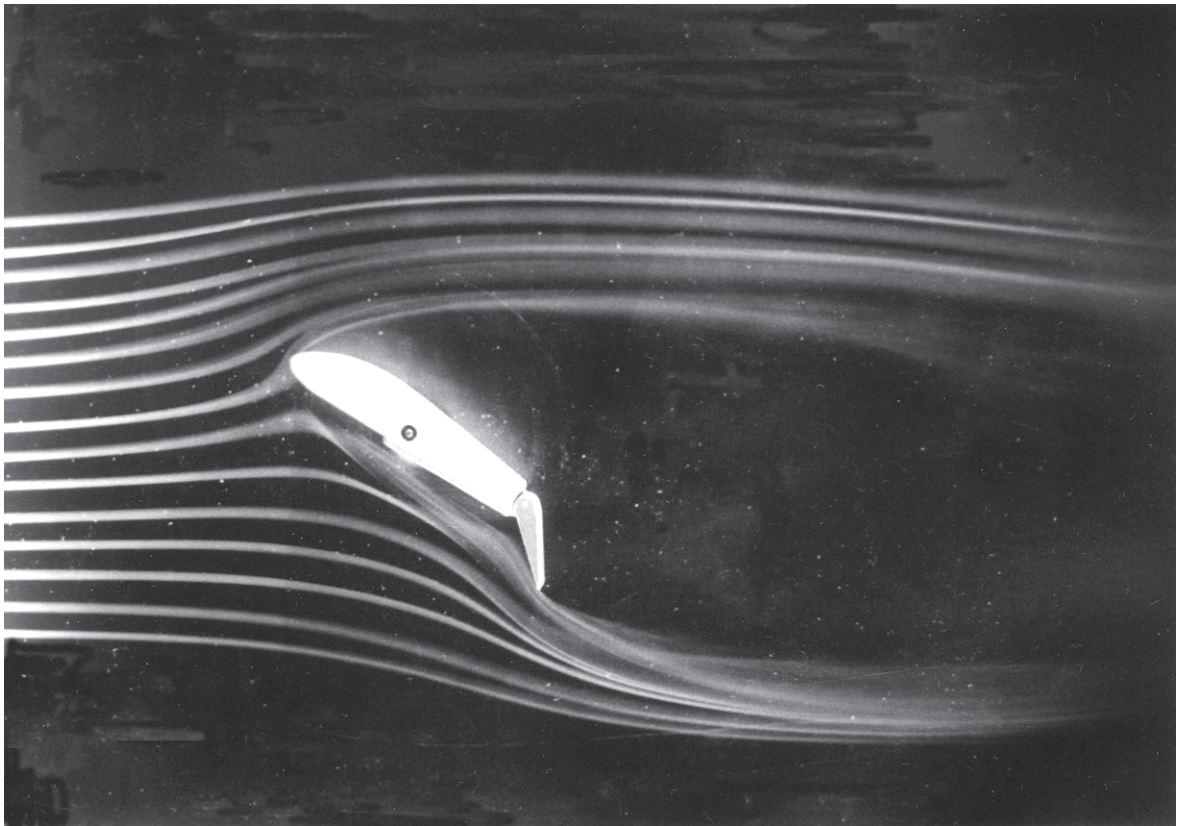
### **PROFIL KŘÍDLA S JEDNODUCHOU KLAPKOU**



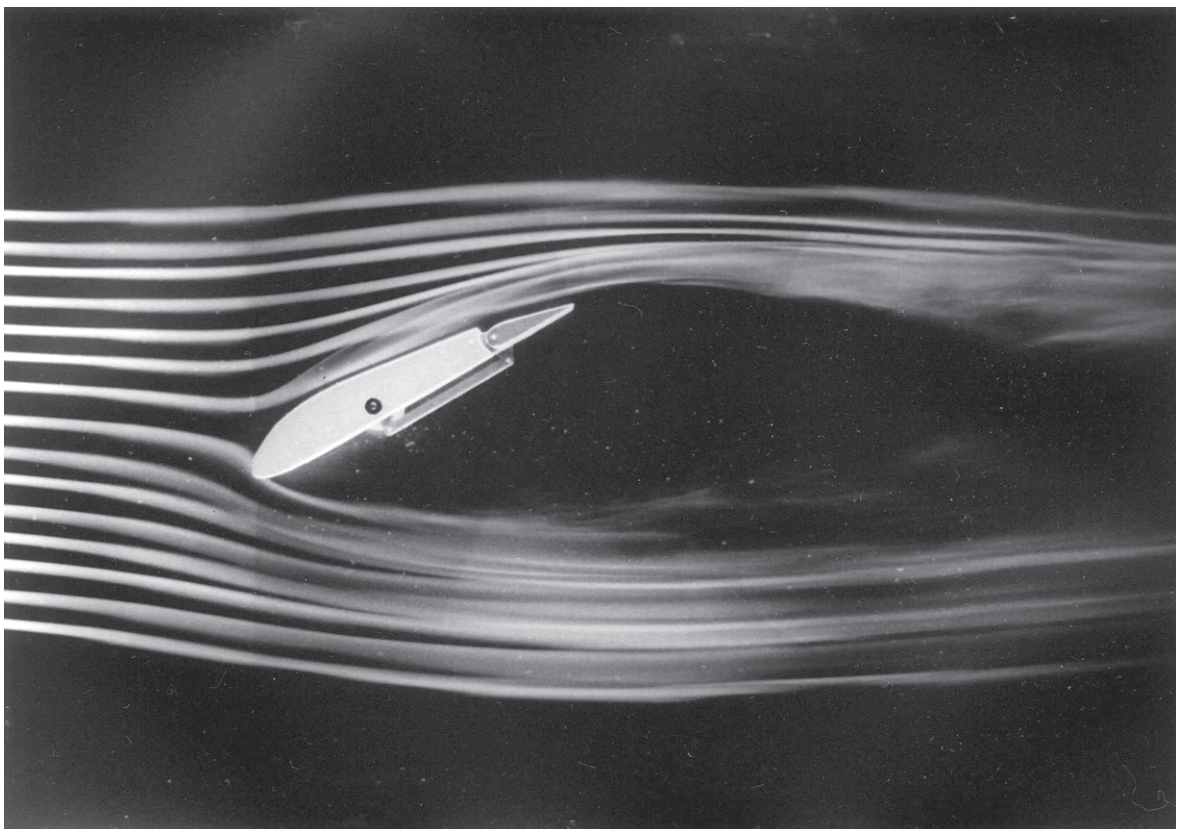
*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )*



*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka klapky  $25^\circ$ )*

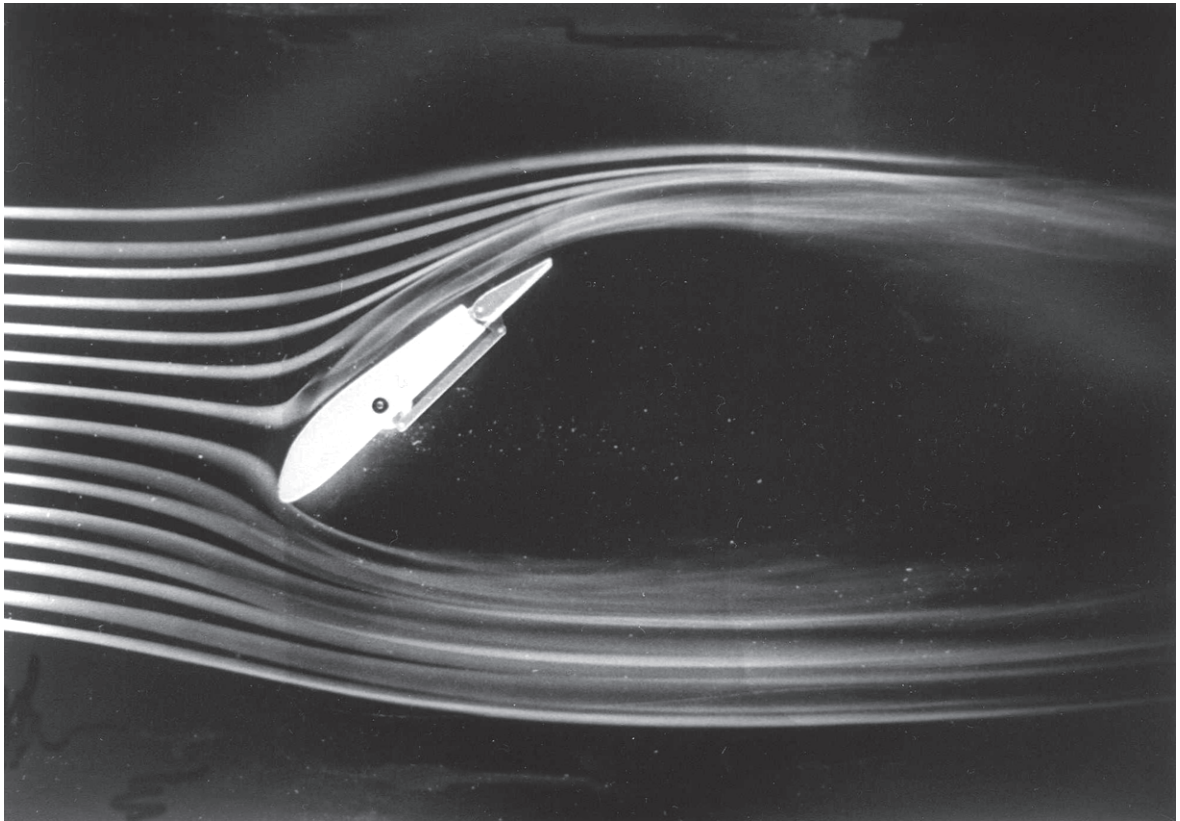


*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=30^\circ$ , výchylka klapky  $50^\circ$ )*

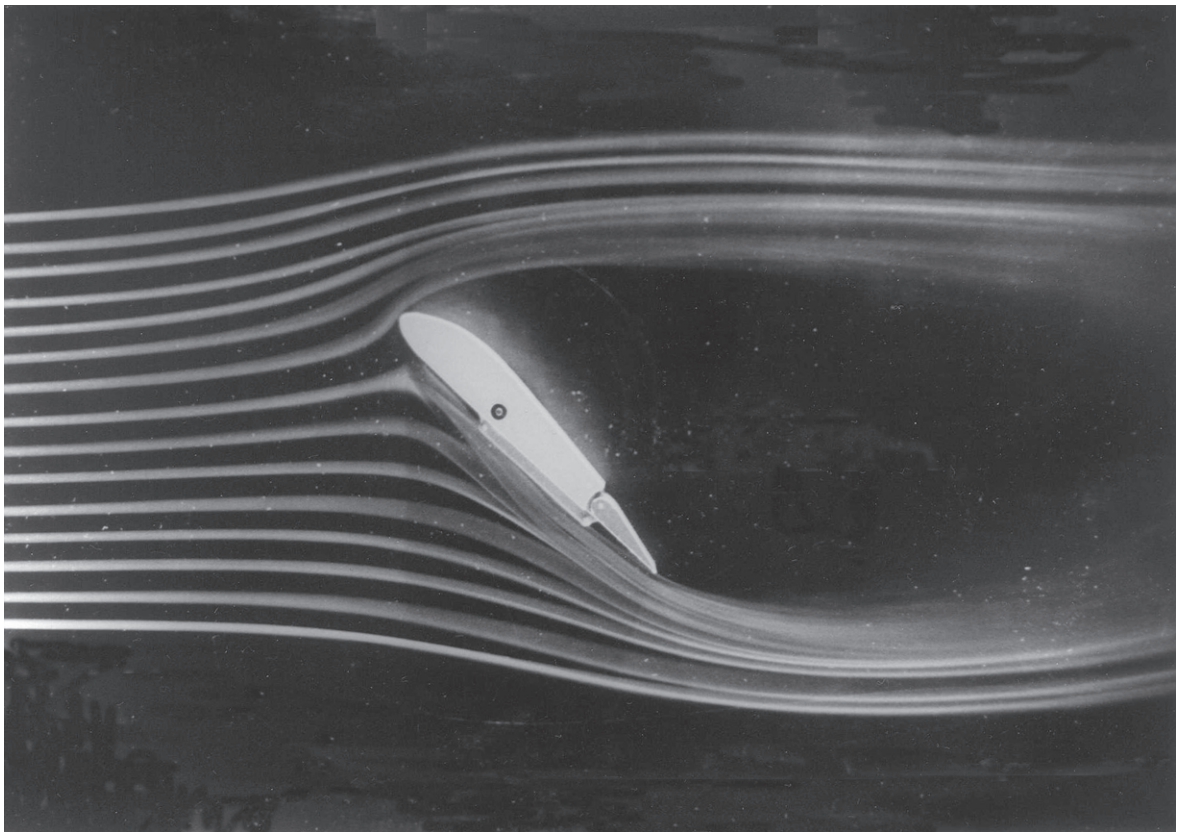


*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha=-30^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )*





*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha = -45^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )*

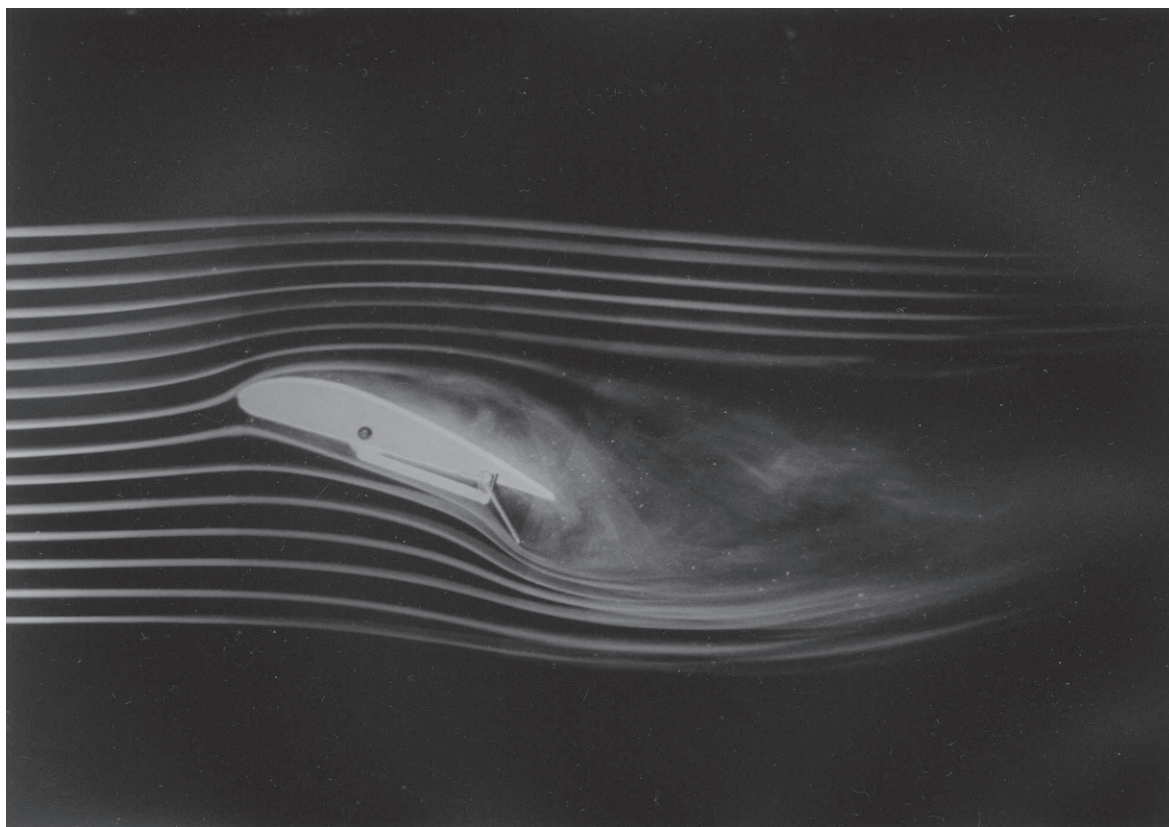


*Profil křídla s jednoduchou klapkou ( $\alpha = 45^\circ$ , výchylka klapky  $0^\circ$ )*

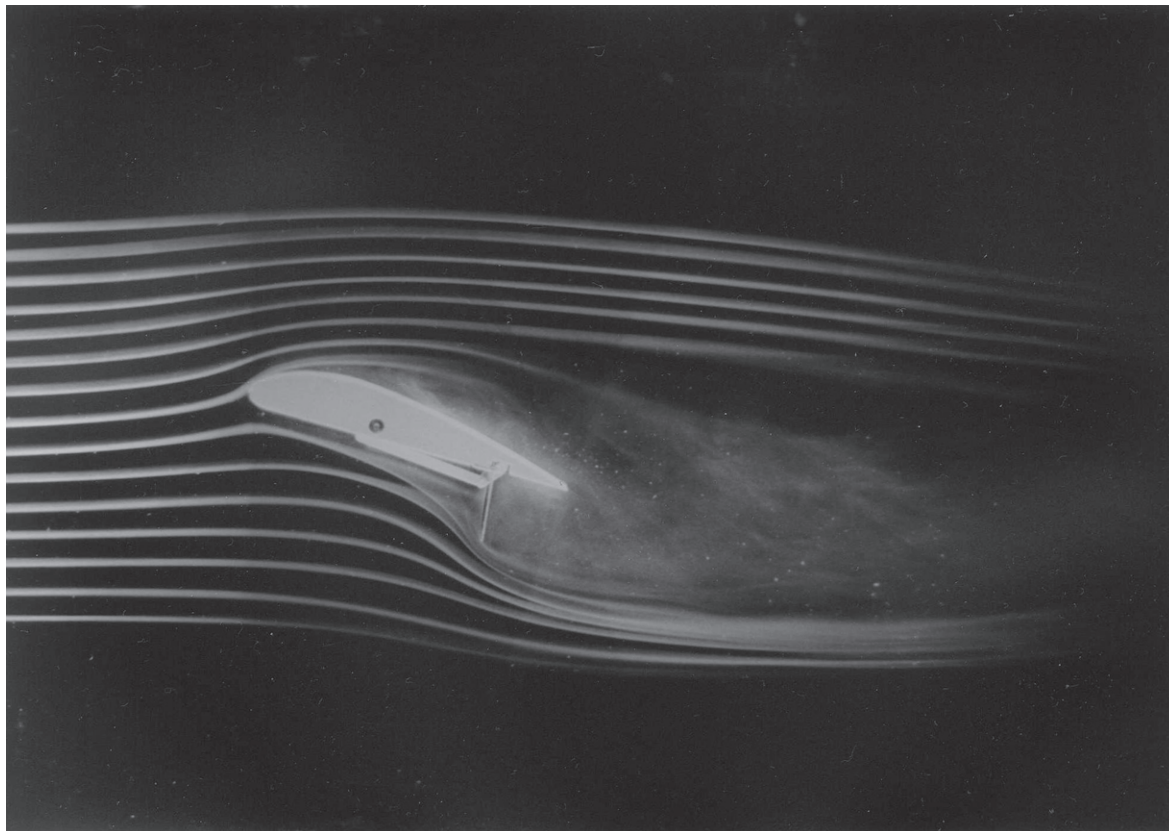
## **PŘÍLOHA II**

### **PROFIL KŘÍDLA S ODKLÁPĚCÍ KLAPKOU**

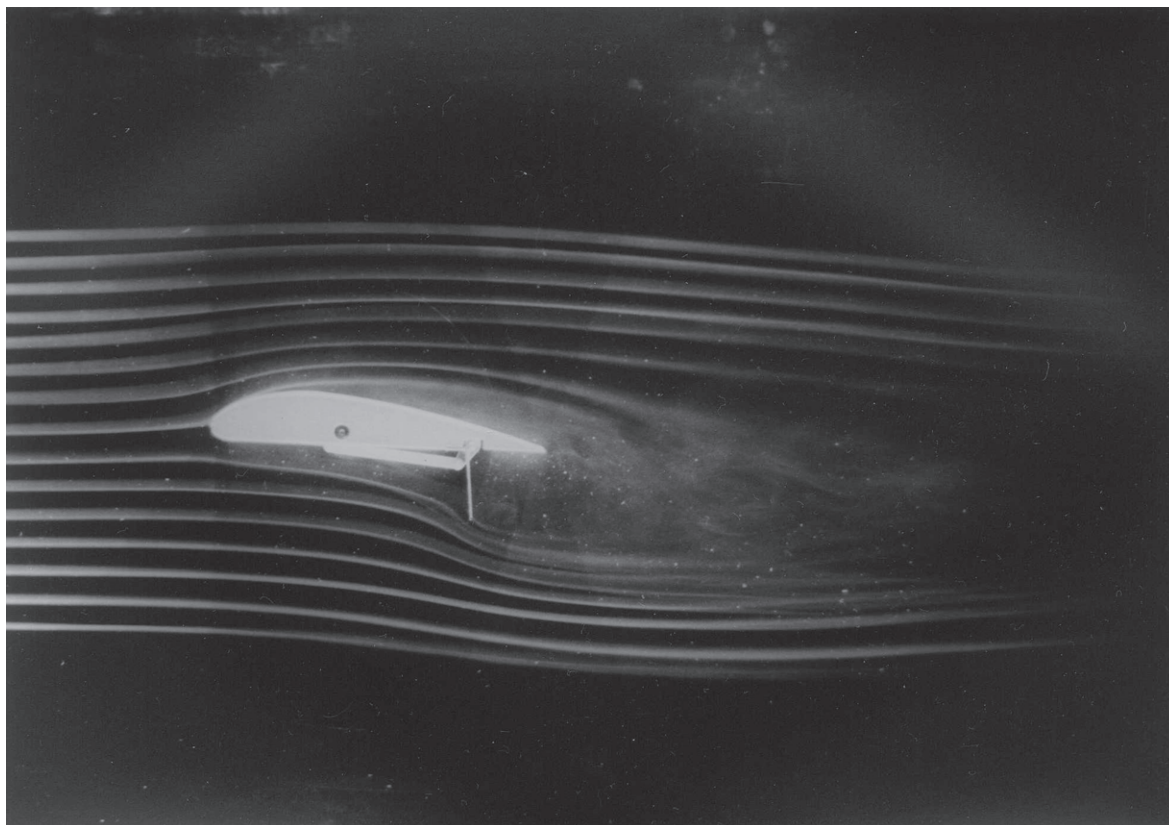




*Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka klapky  $42^\circ$ )*



*Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=15^\circ$ , výchylka klapky  $85^\circ$ )*

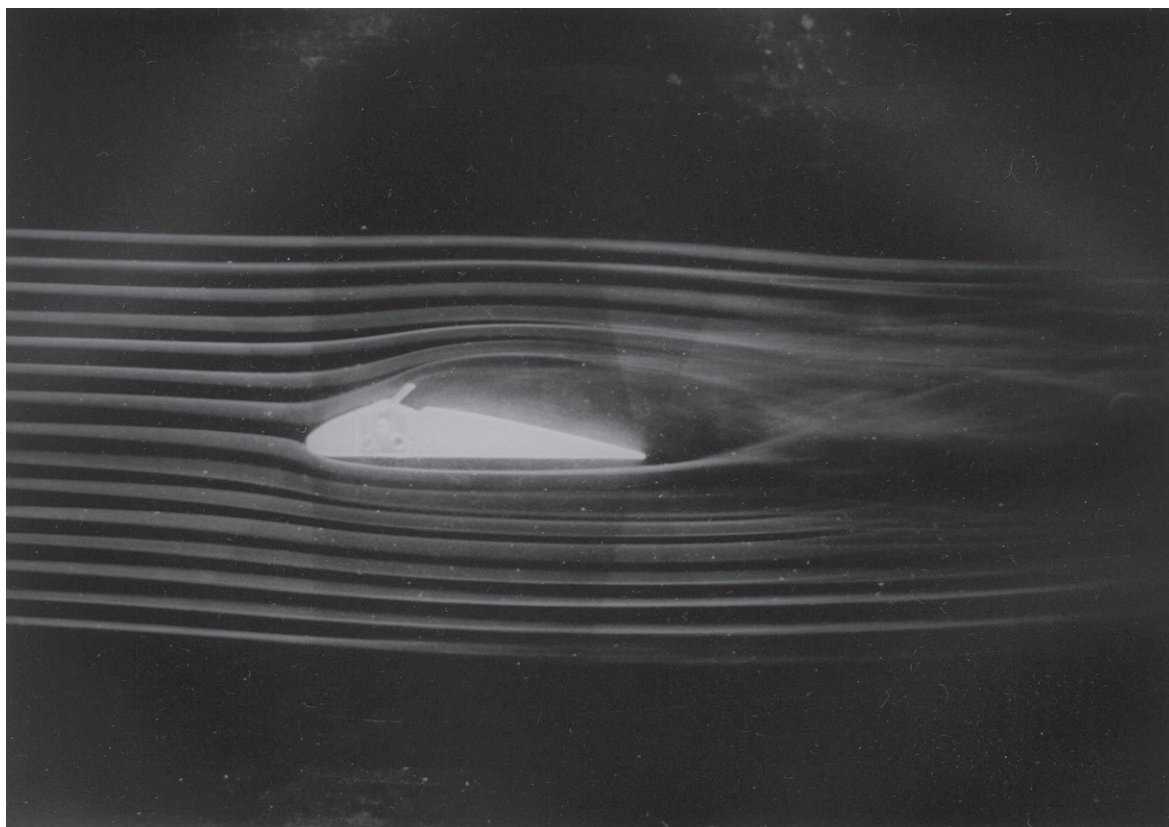


*Profil křídla s odklápěcí klapkou ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka klapky  $85^\circ$ )*

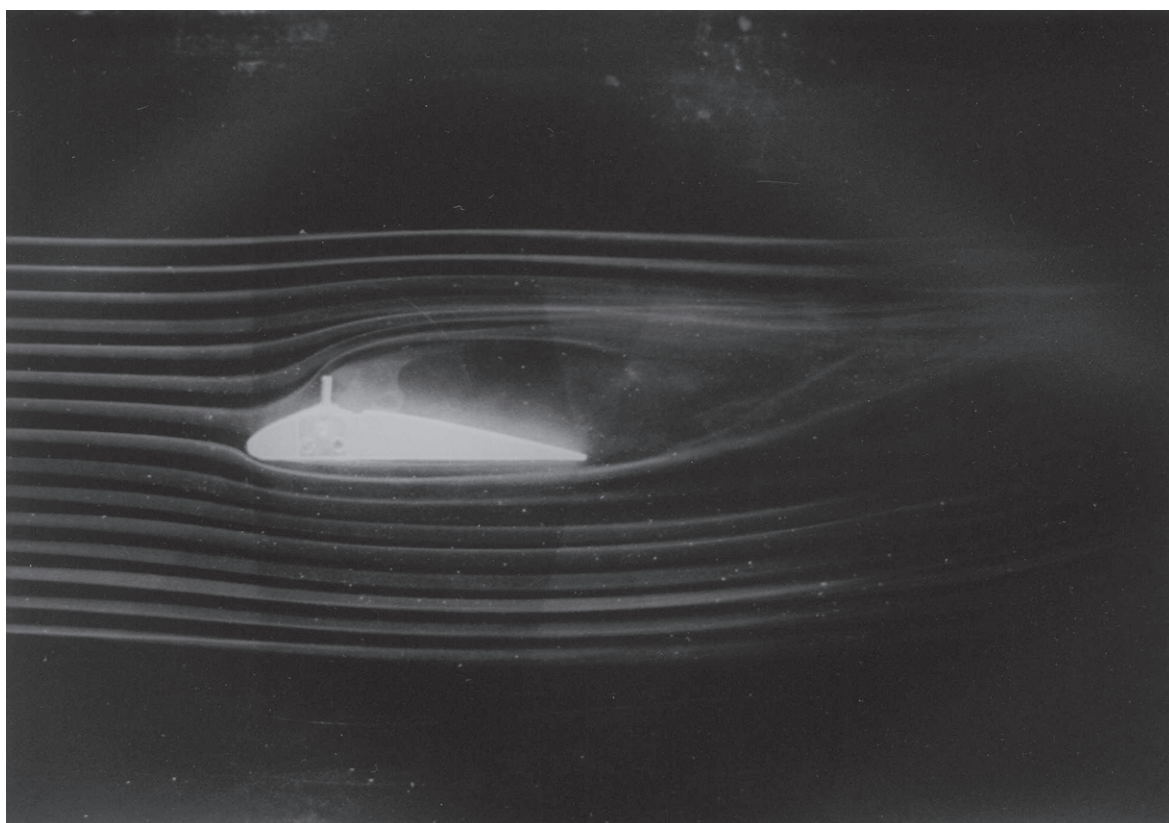
## **PŘÍLOHA III**

### **PROFIL KŘÍDLA SE SPOILEREM**

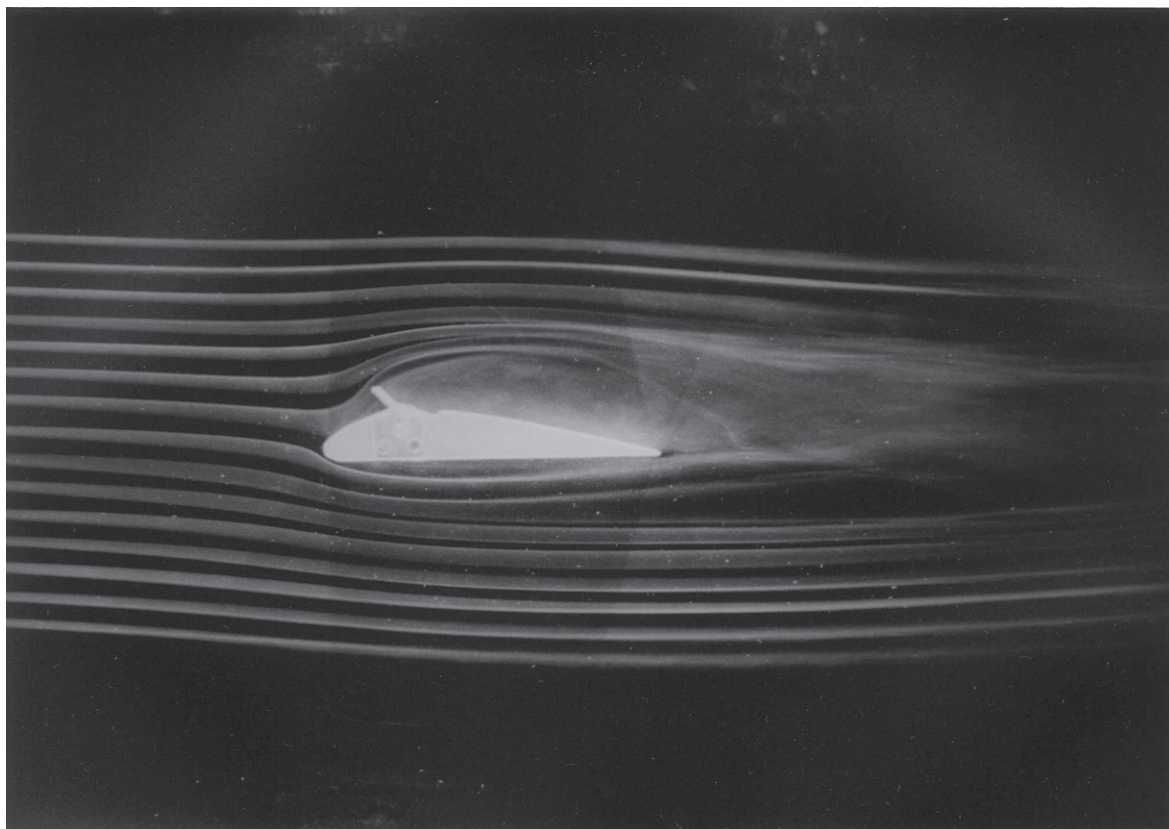




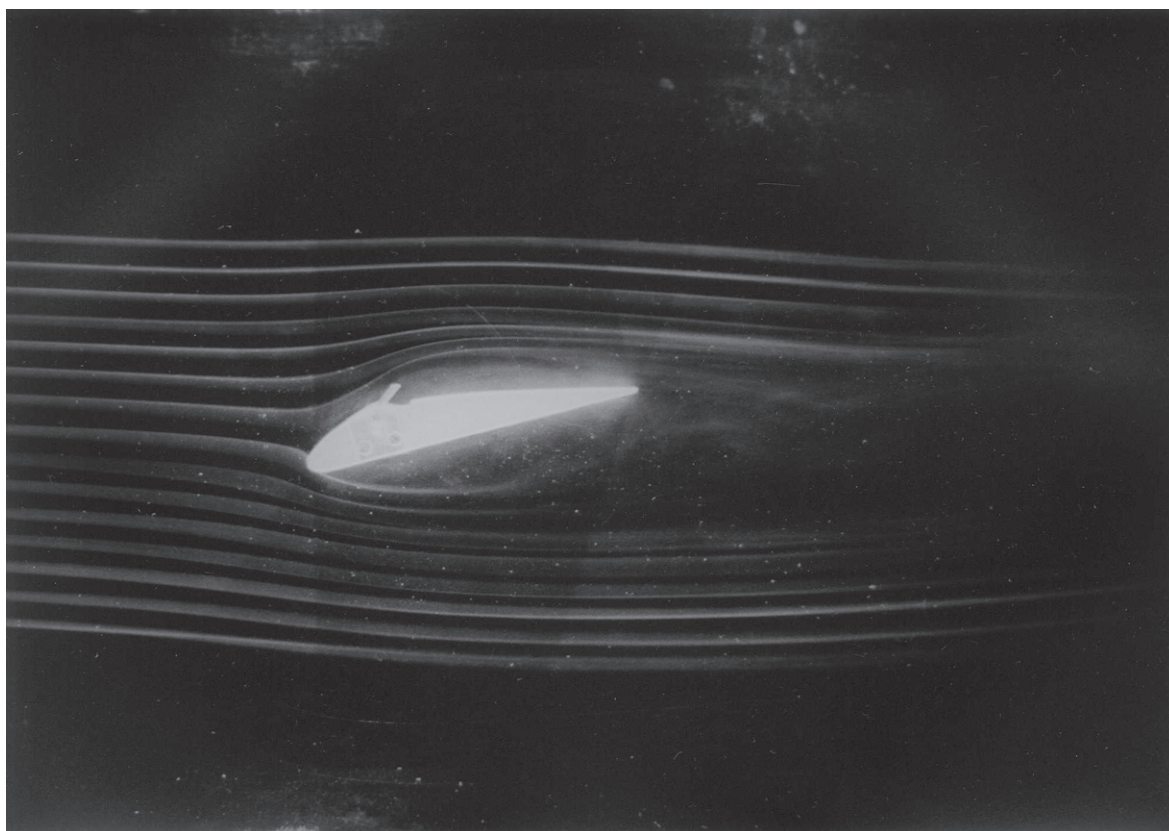
*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka spoileru  $45^\circ$ )*



*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka spoileru  $90^\circ$ )*

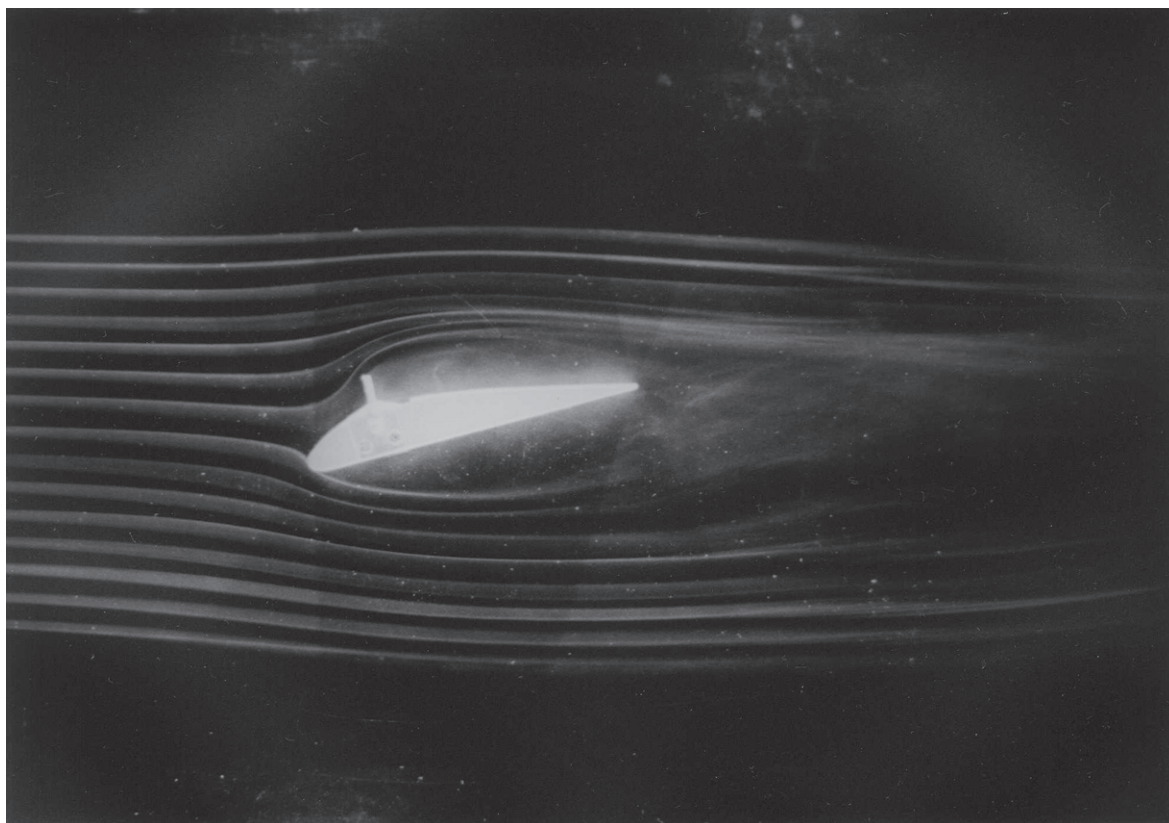


*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=0^\circ$ , výchylka spoileru  $135^\circ$ )*

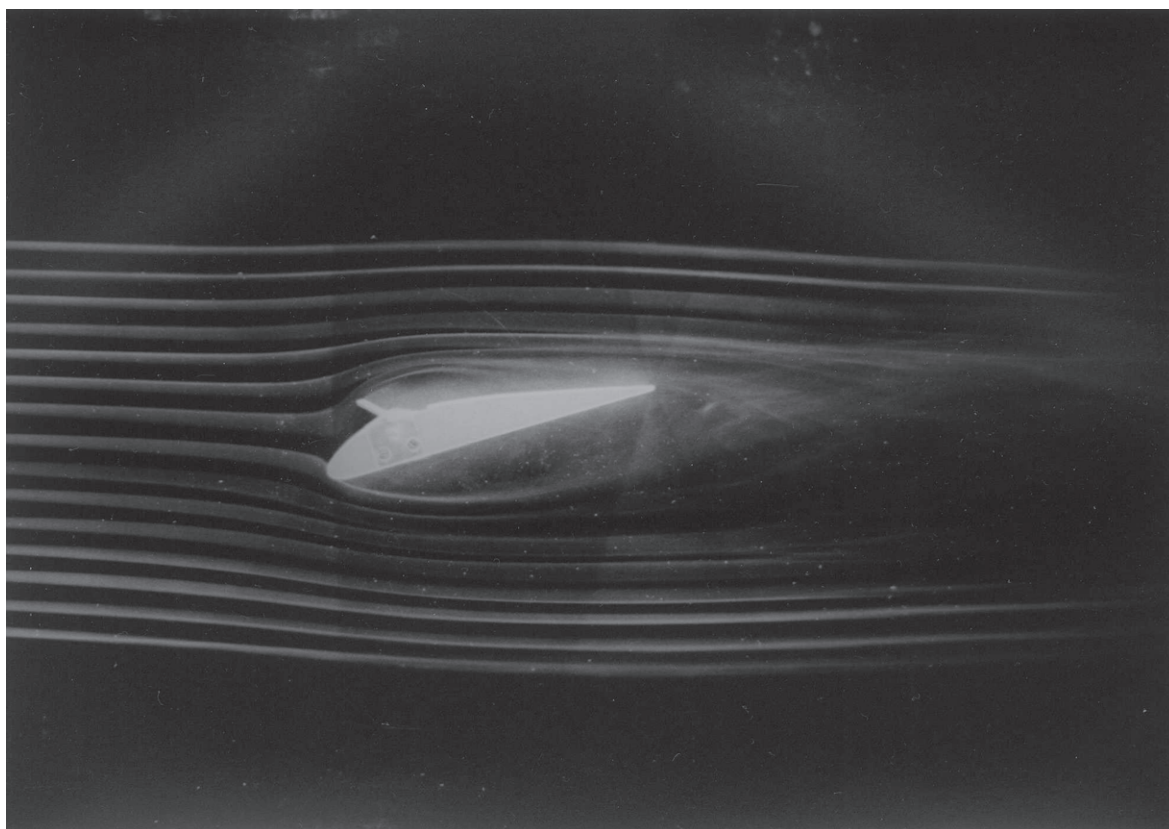


*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=-15^\circ$ , výchylka spoileru  $45^\circ$ )*





*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=-15^\circ$ , výchylka spoileru  $90^\circ$ )*

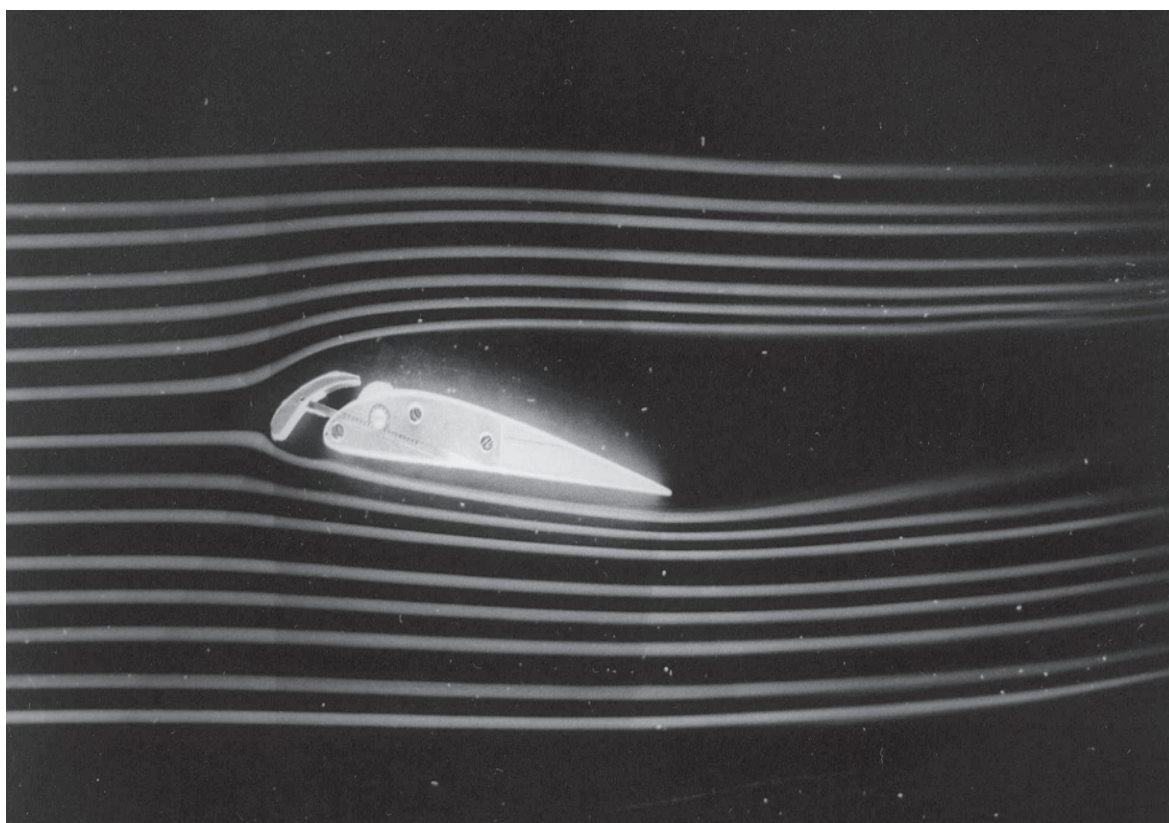


*Profil křídla se spoilerem ( $\alpha=-15^\circ$ , výchylka spoileru  $135^\circ$ )*

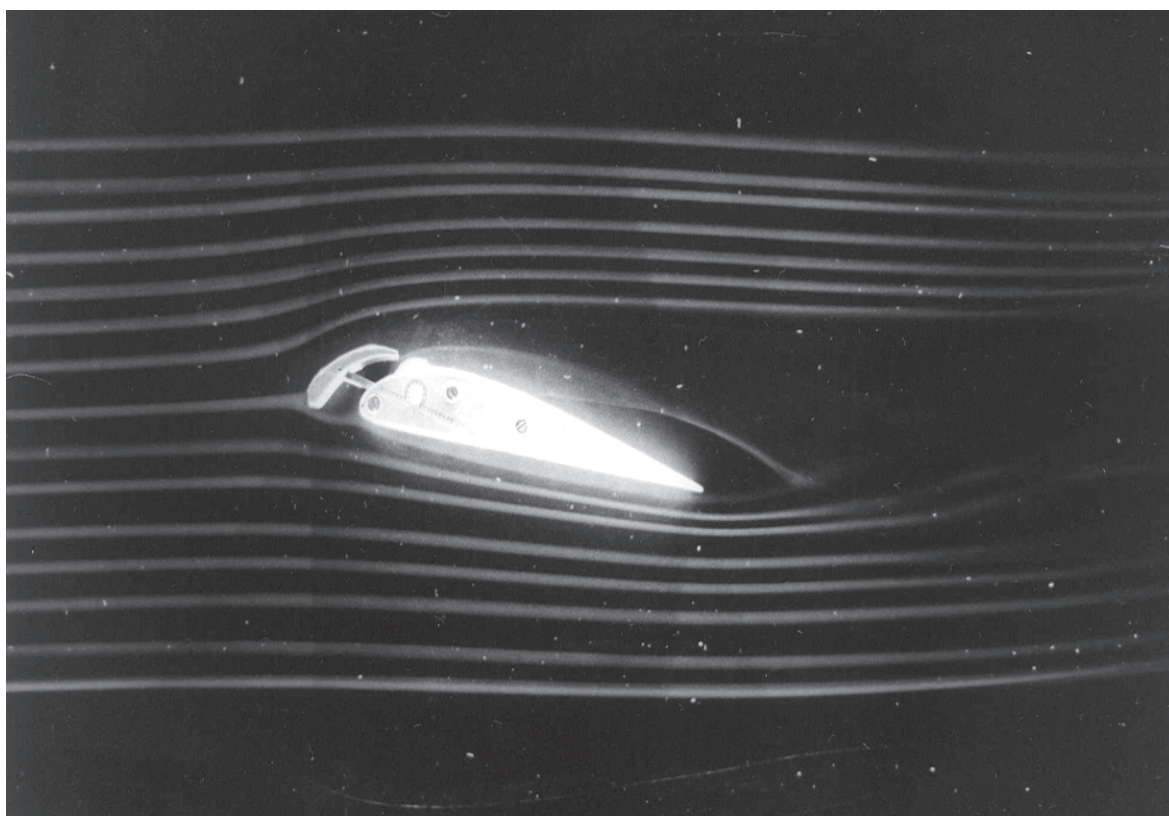


## **PŘÍLOHA IV**

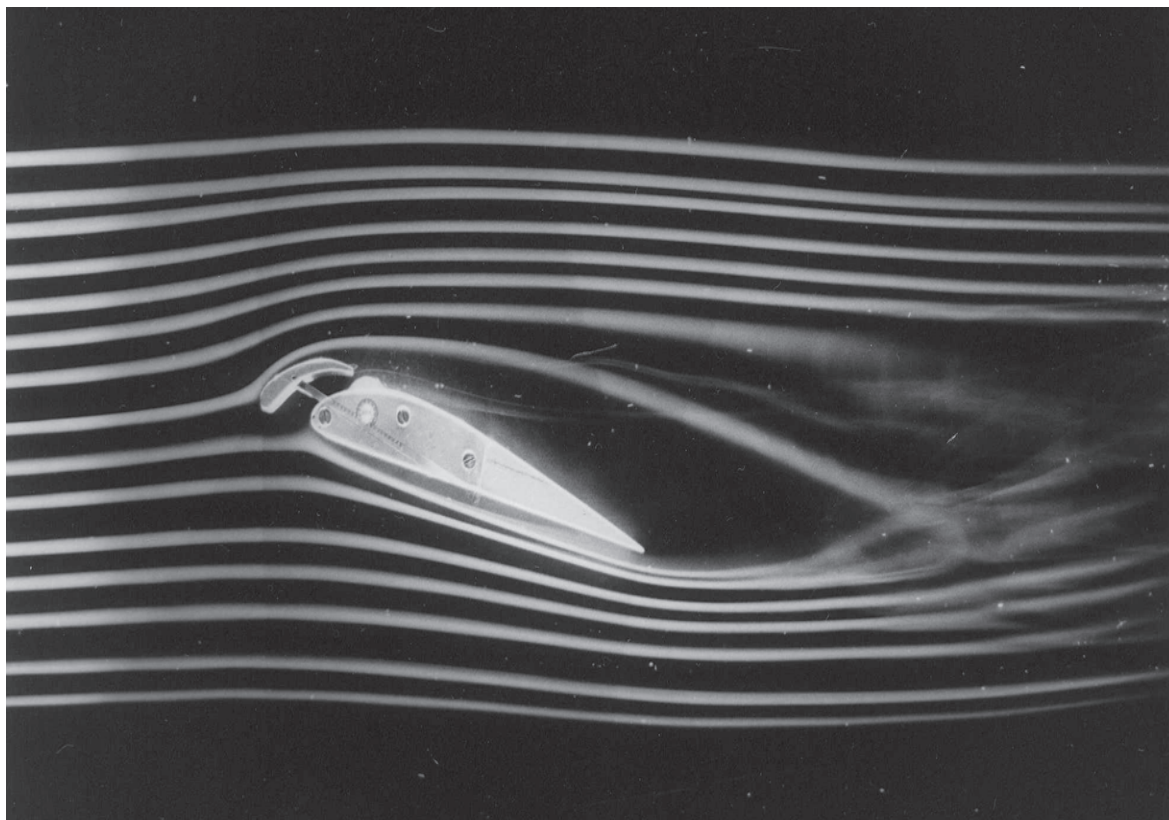
### **PROFIL S VÝSUVNÝM SLOTEM**



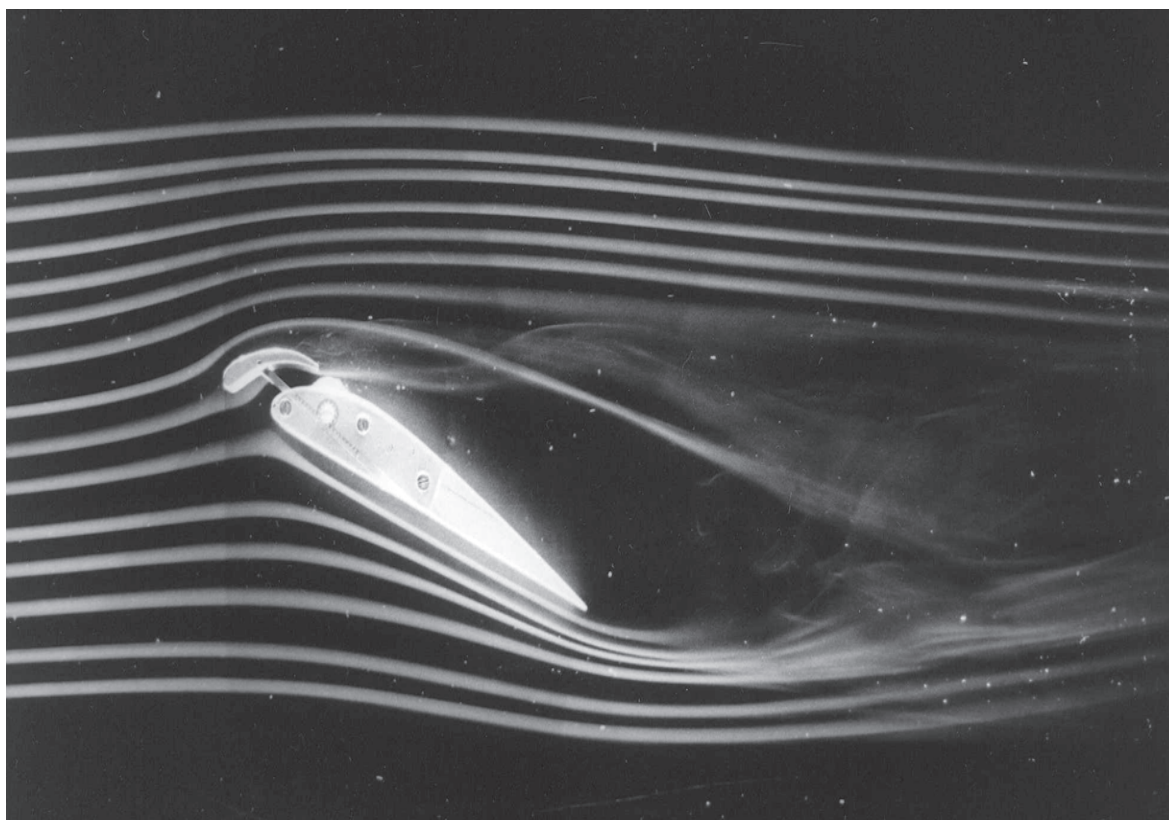
*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=5^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*



*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=7^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

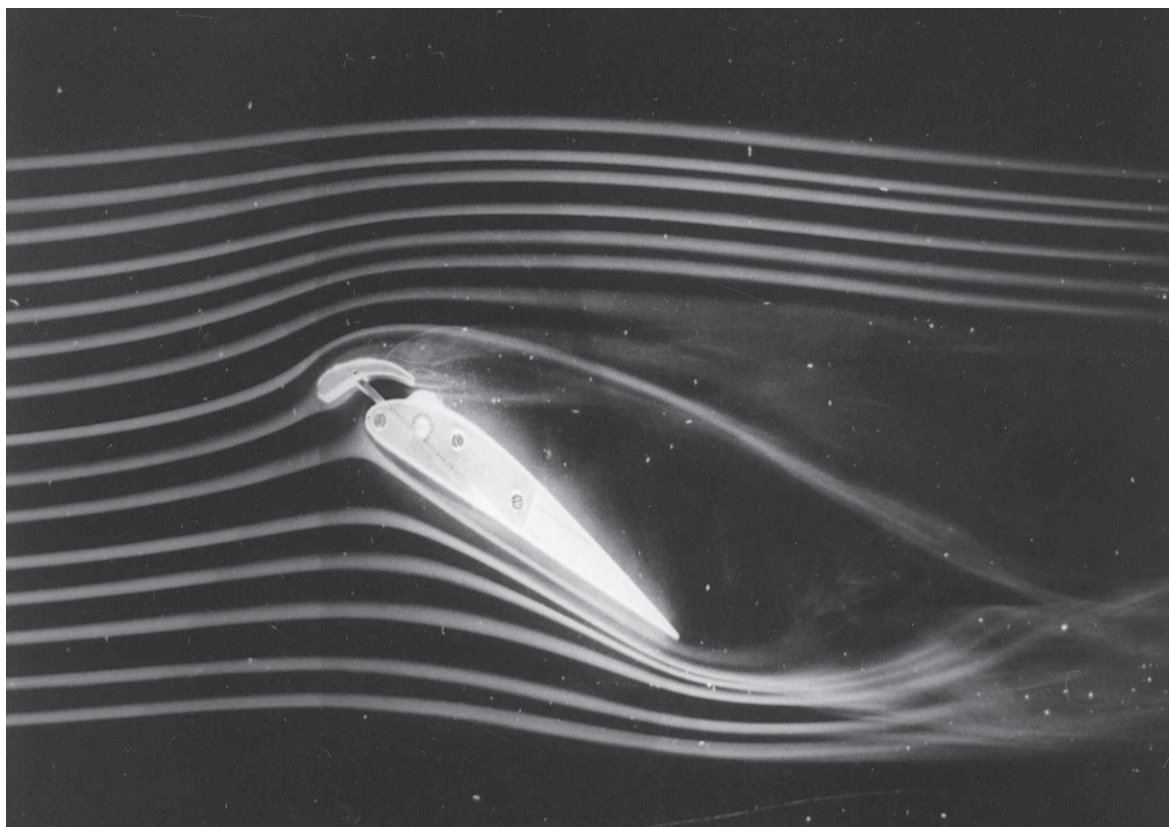


*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=15^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

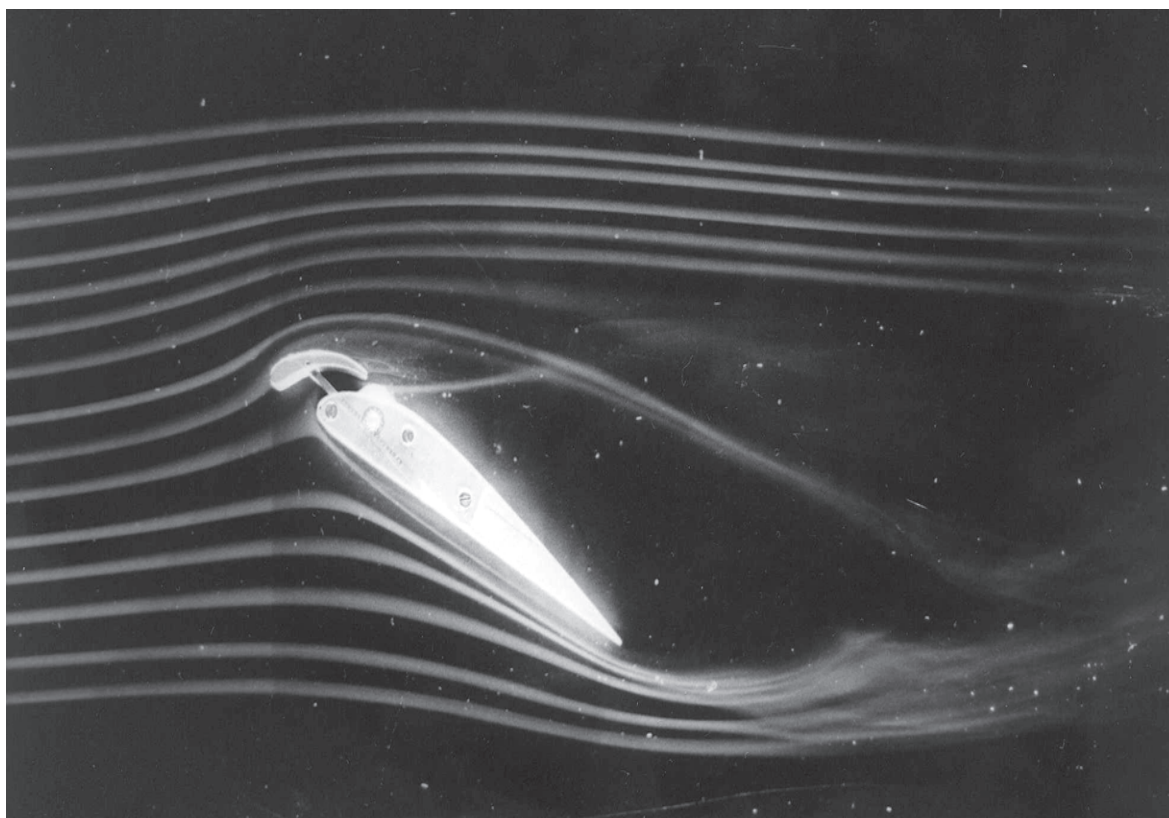


*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=23^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

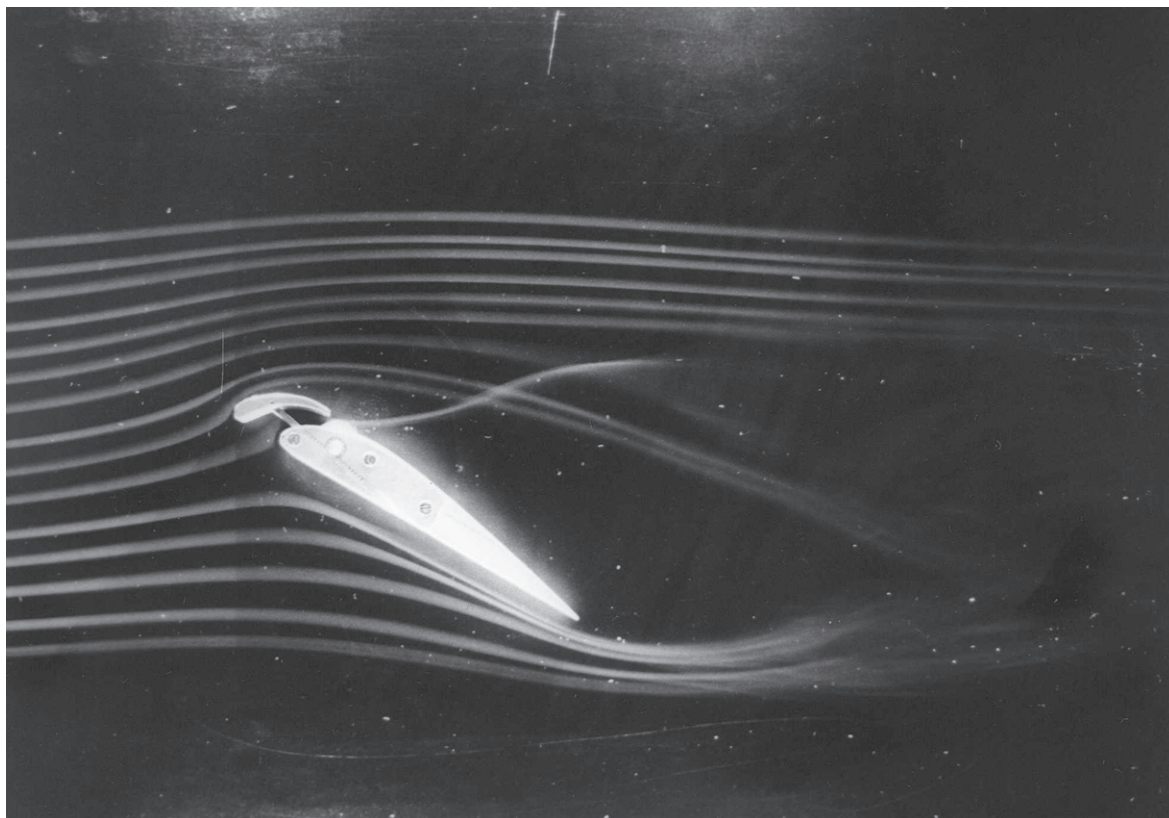




*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=26^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*



*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=28^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

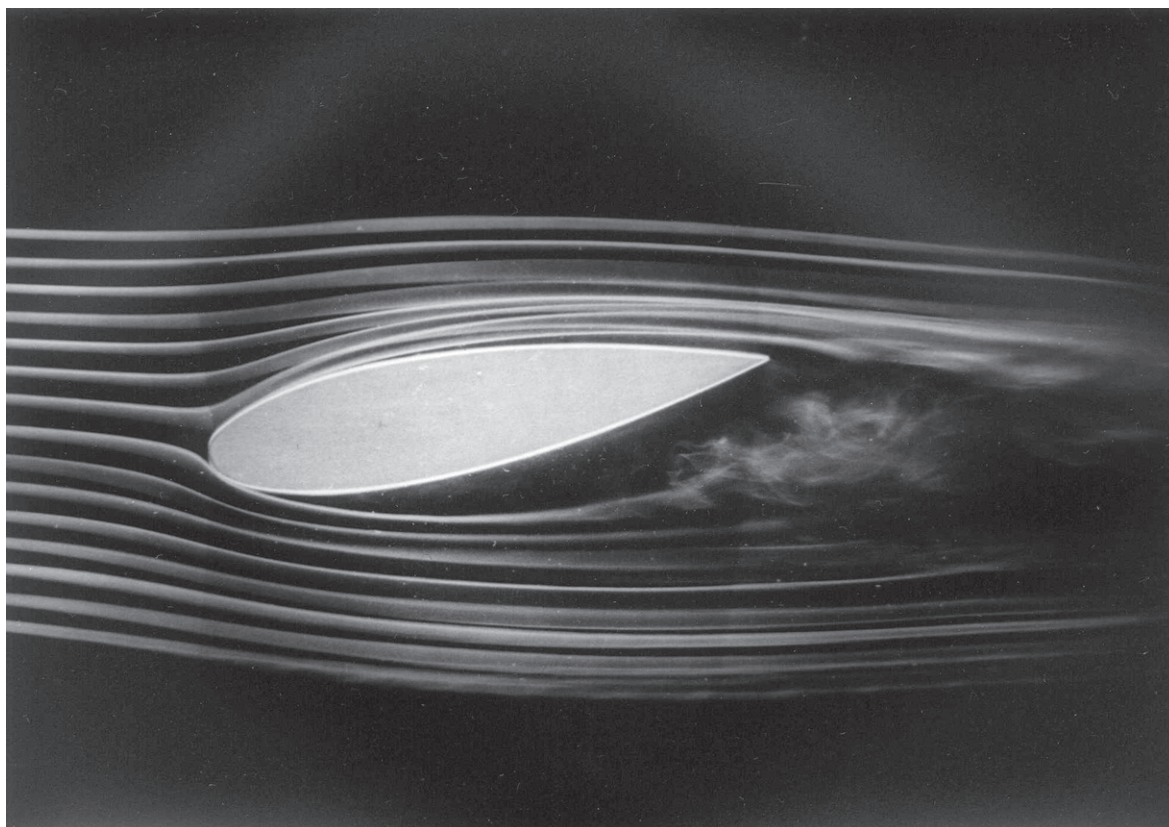


*Profil s výsuvným slotem ( $\alpha=30^\circ$ , vysunutí slotu 4 mm)*

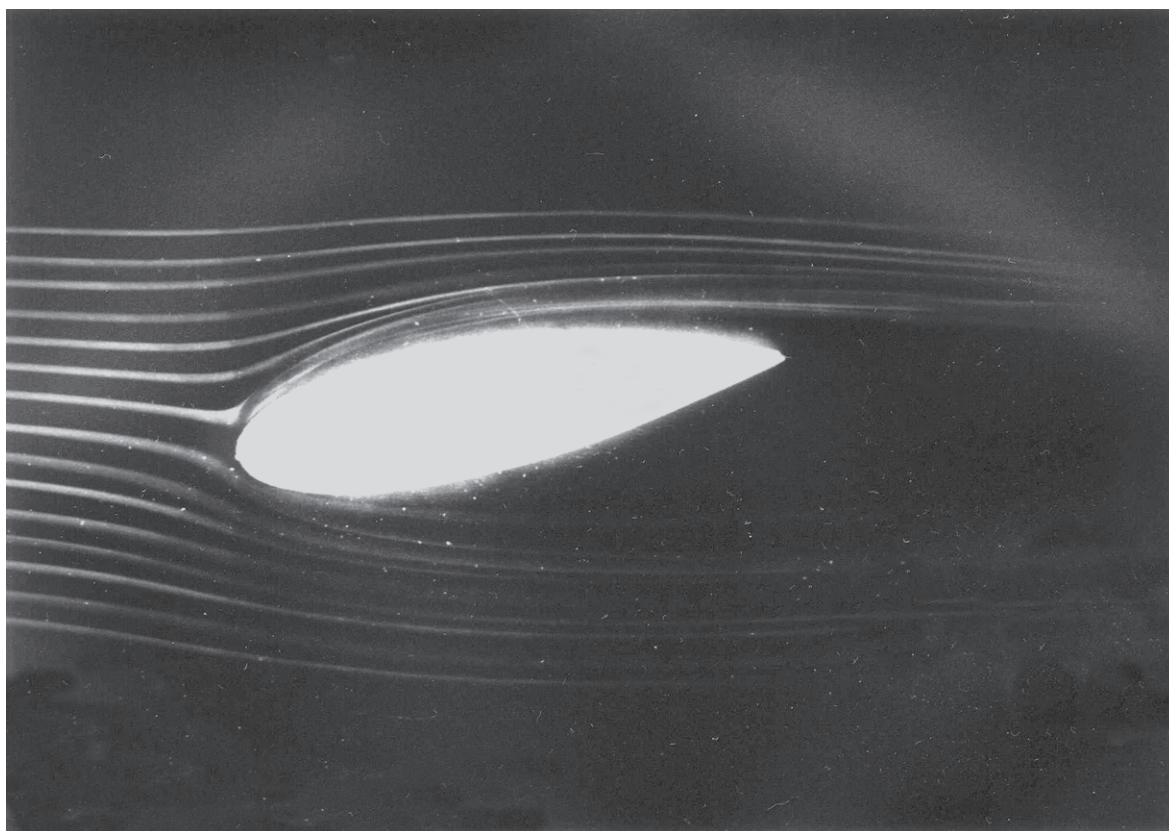


## **PŘÍLOHA V**

### **SYMETRICKÝ PROFIL KŘÍDLA**

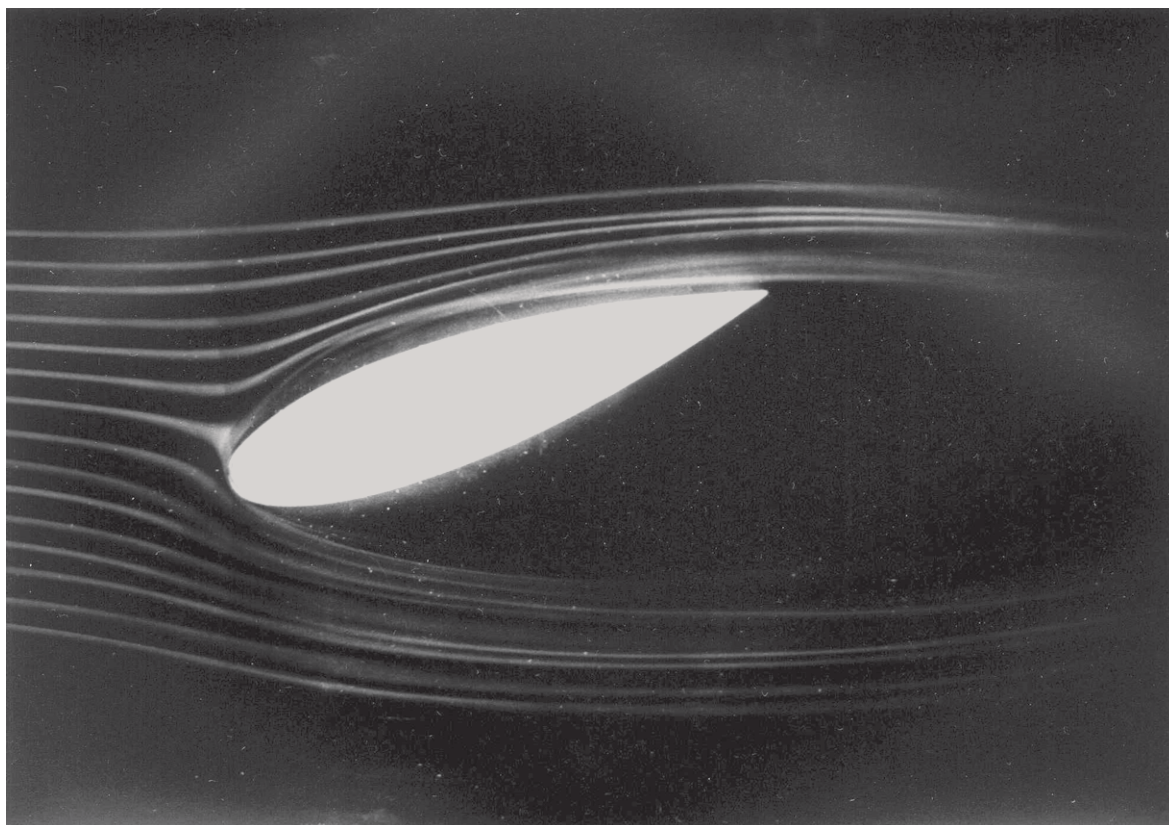


*Symetrický profil křídla ( $\alpha = -10^\circ$ )*

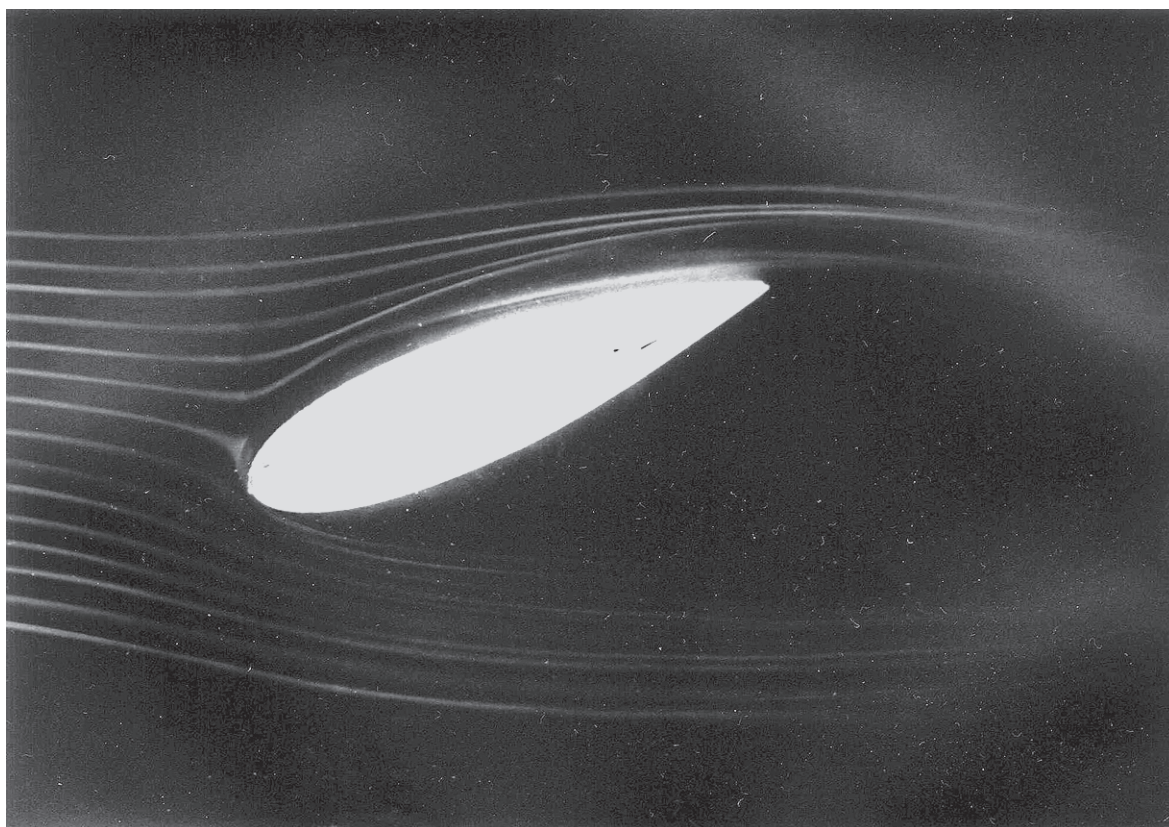


*Symetrický profil, zdrsňený povrch na horní straně křídla ( $\alpha = -10^\circ$ )*





*Symetrický profil křídla ( $\alpha=-20^\circ$ )*

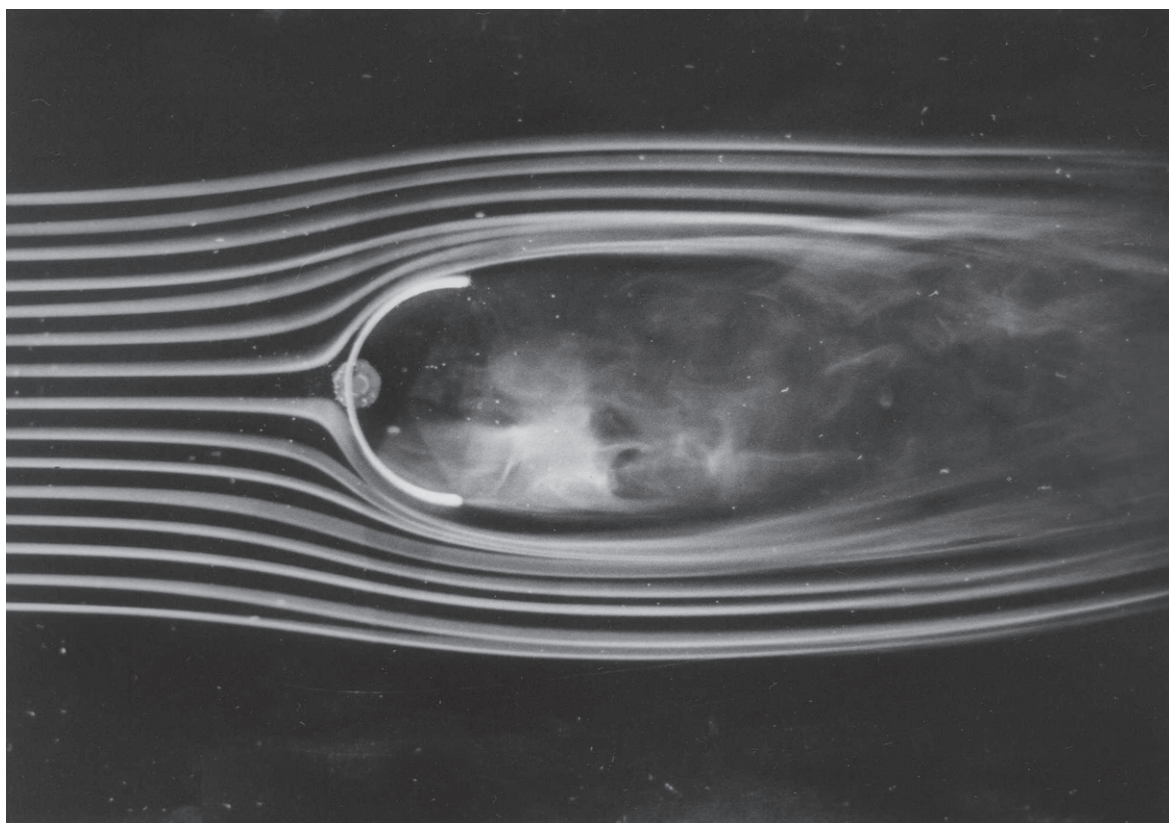


*Symetrický profil, zdrsňený povrch na horní straně křídla ( $\alpha=-20^\circ$ )*

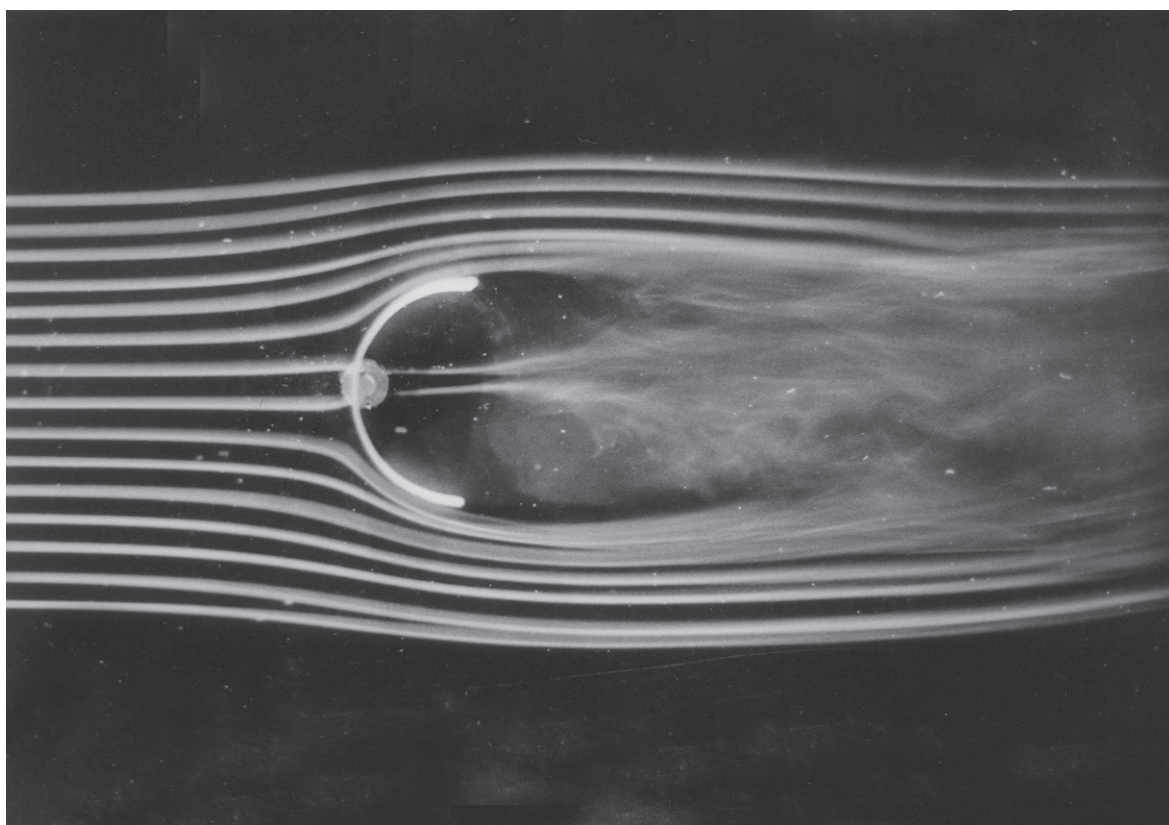
## **PŘÍLOHA VI**

### **PROFIL TVARU "POLOVINA DUTÉHO VÁLCE"**



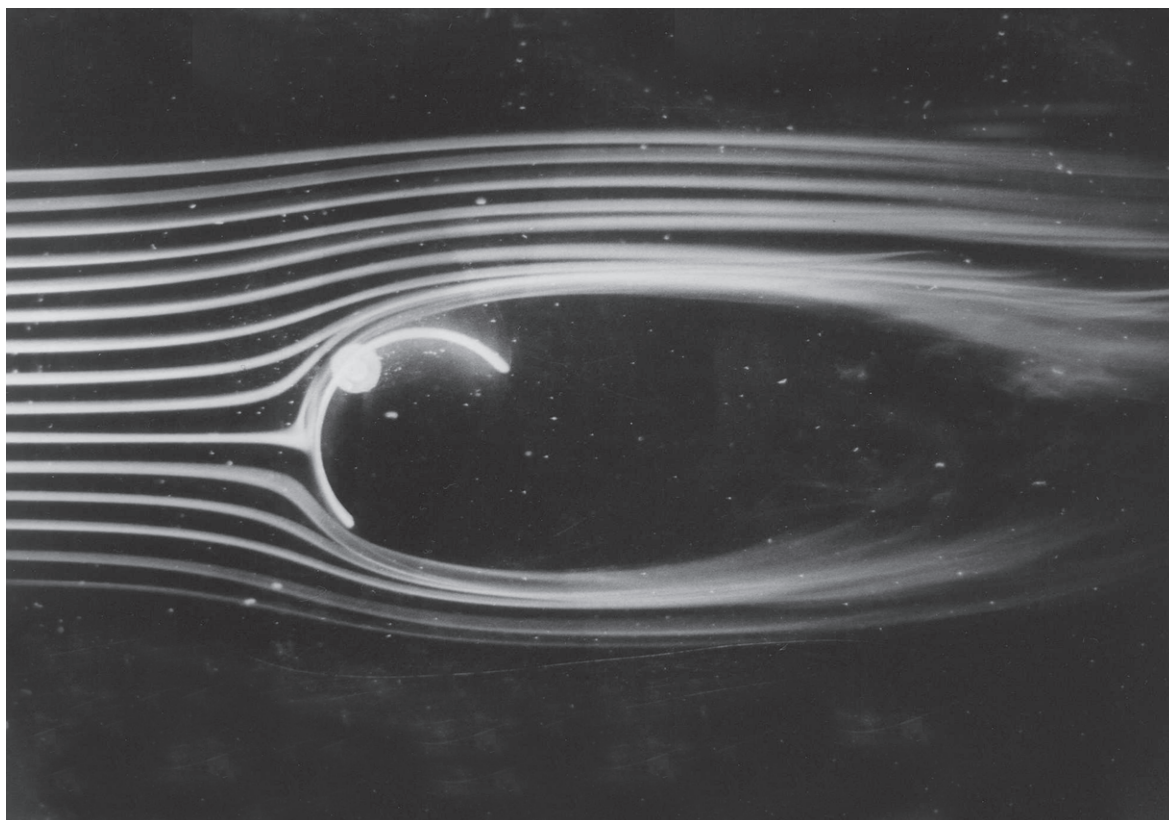


*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*

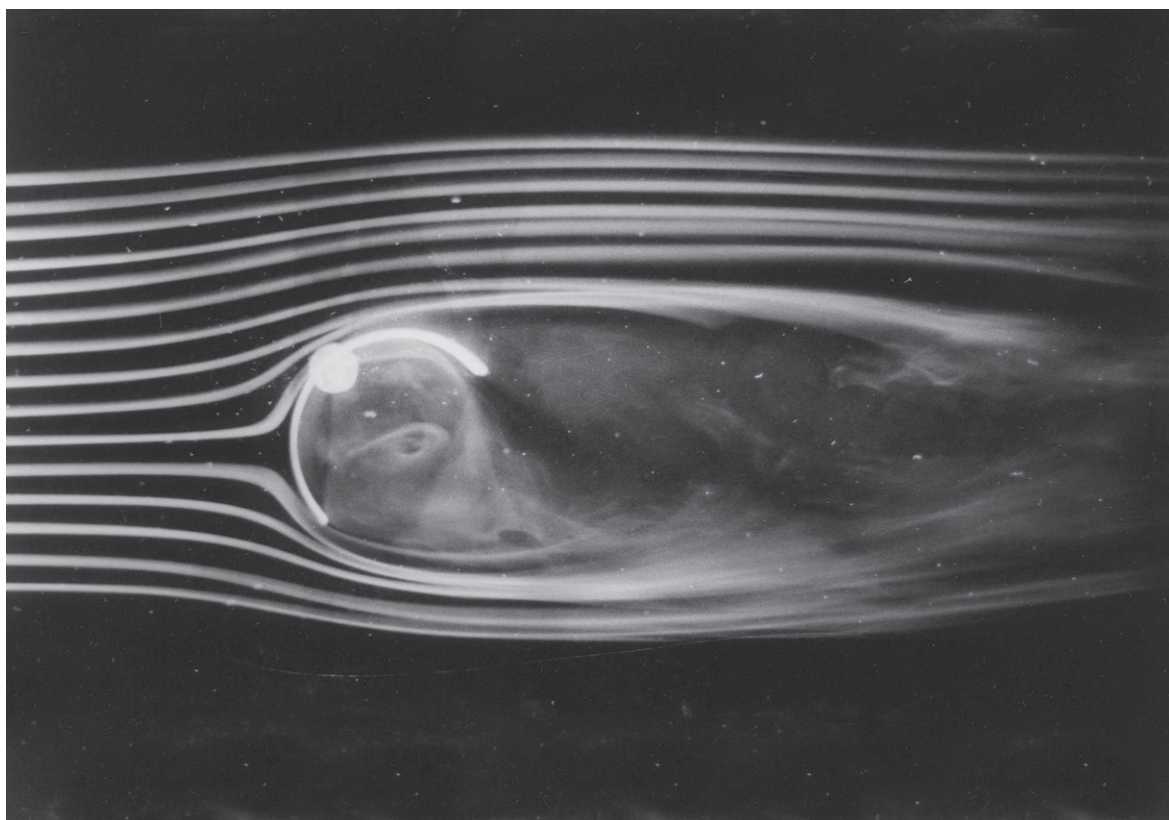


*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*

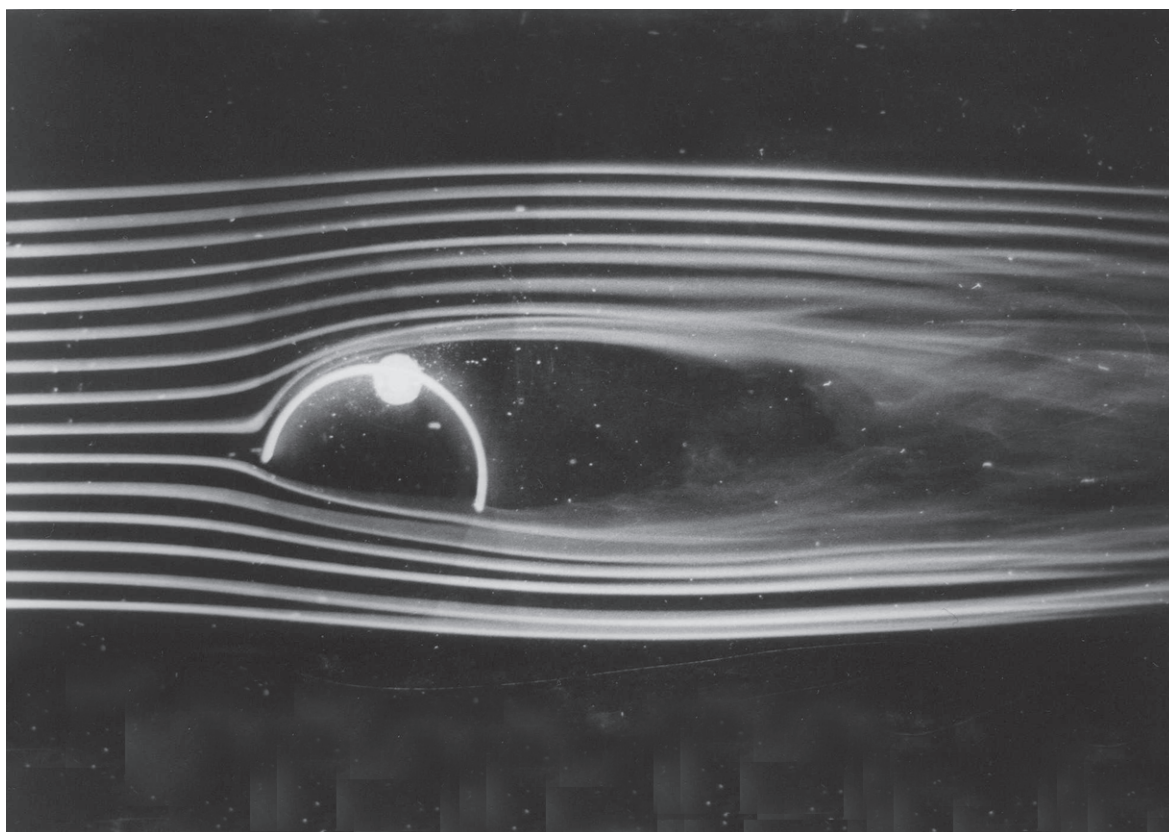




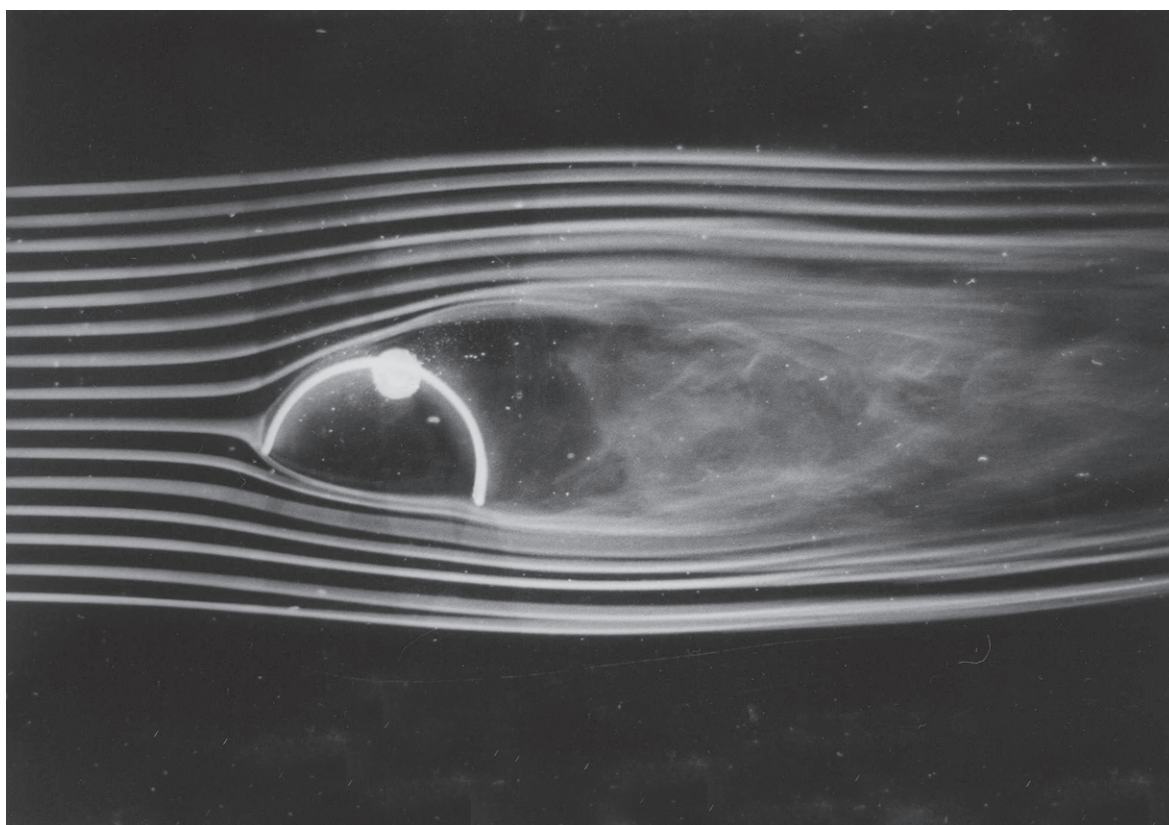
*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*



*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*

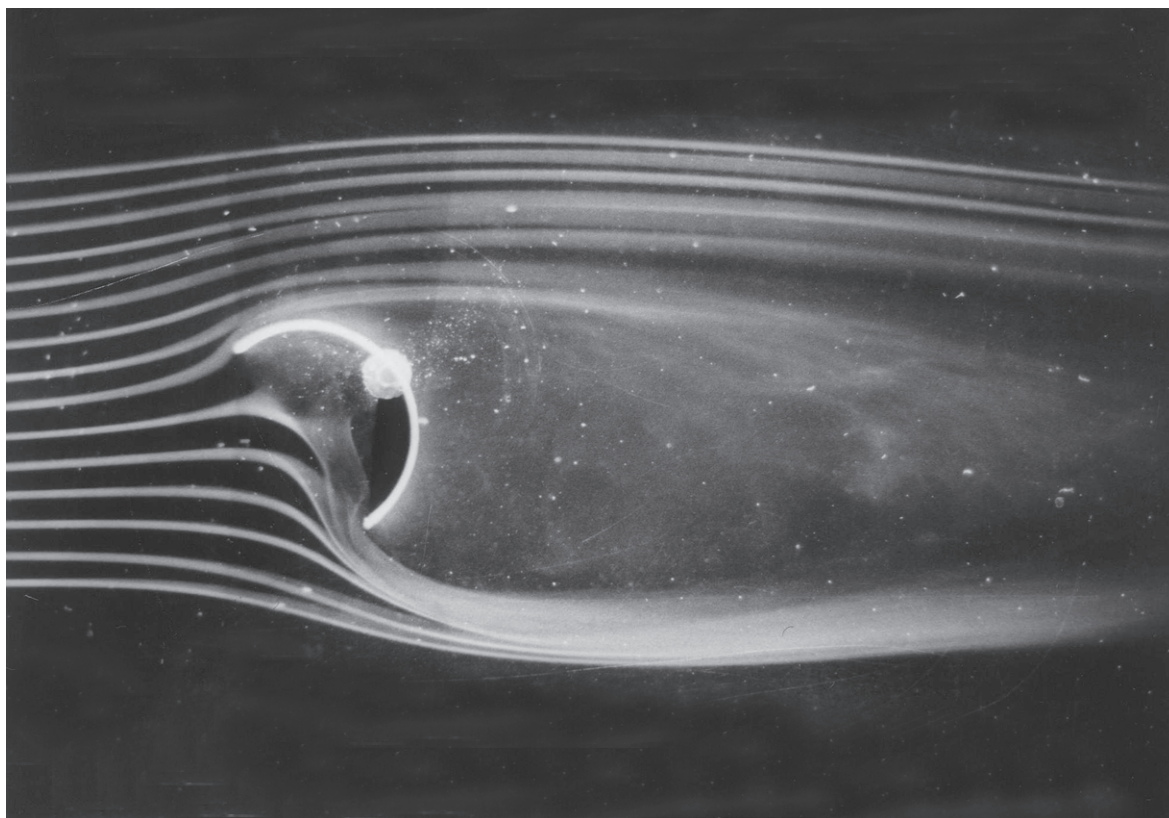


*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*

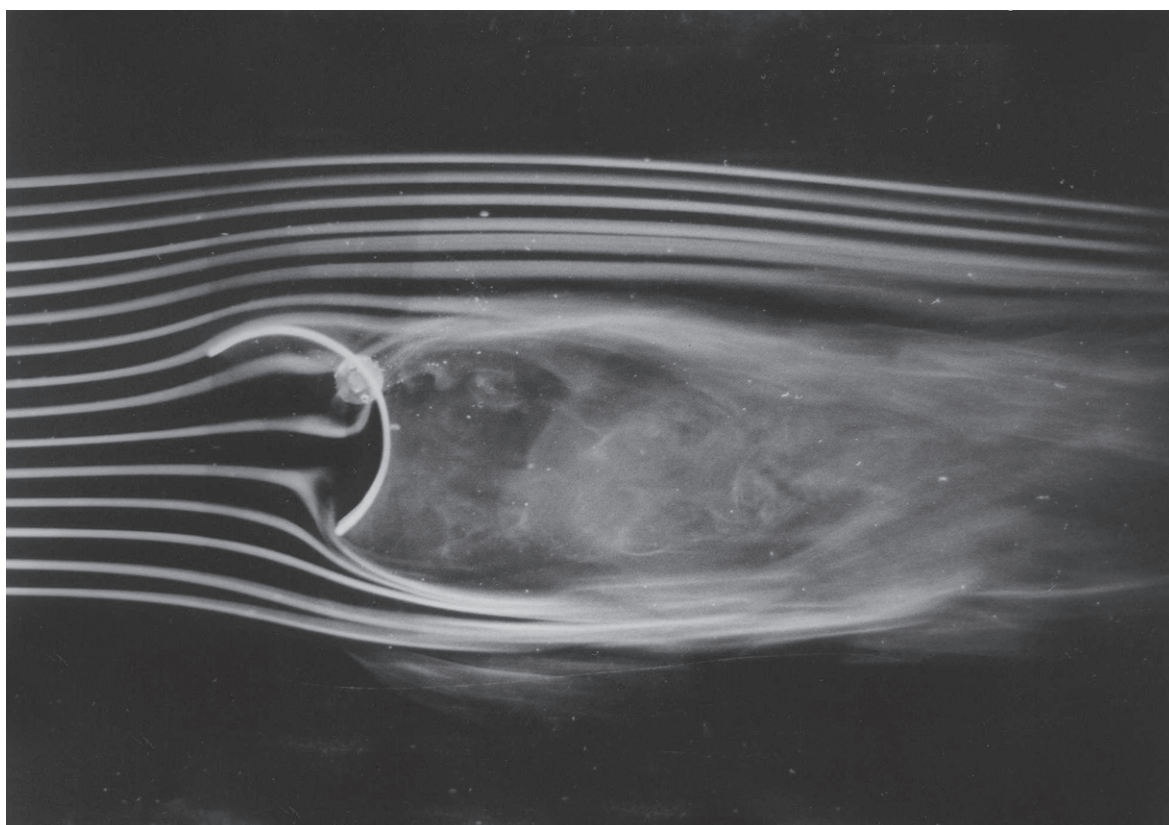


*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*

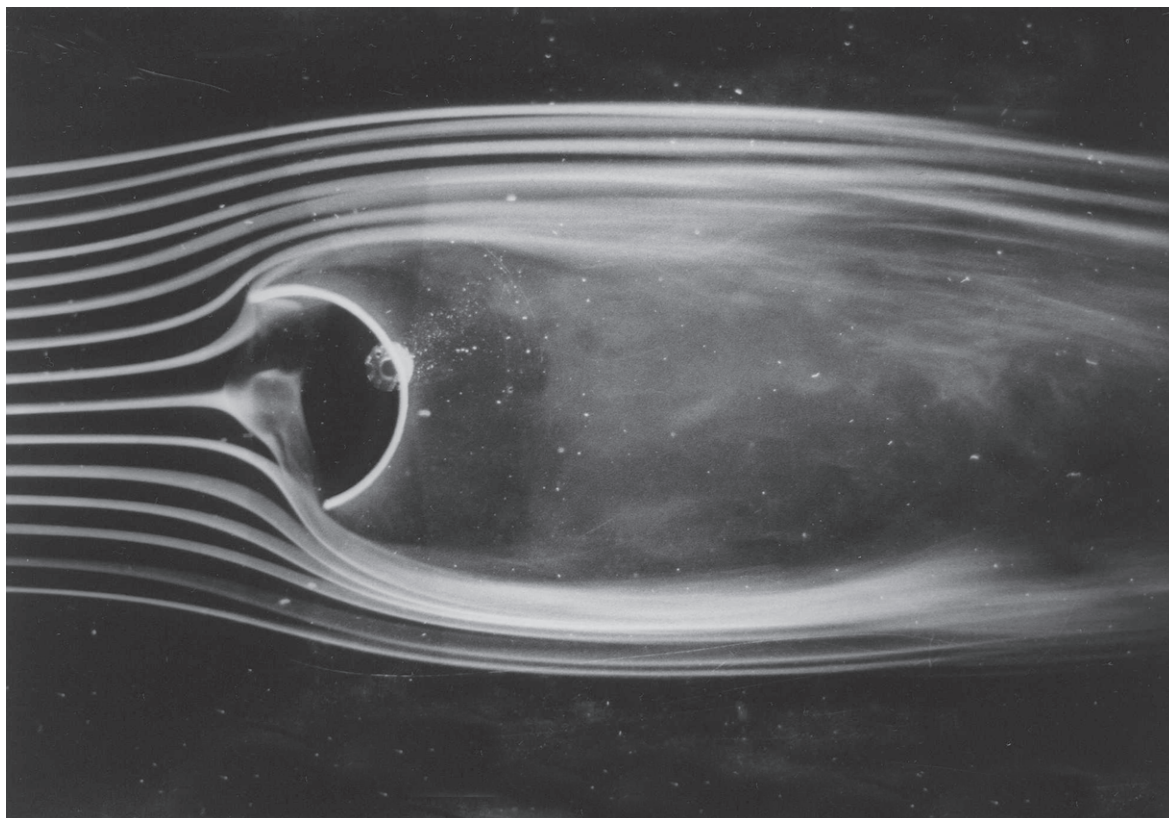




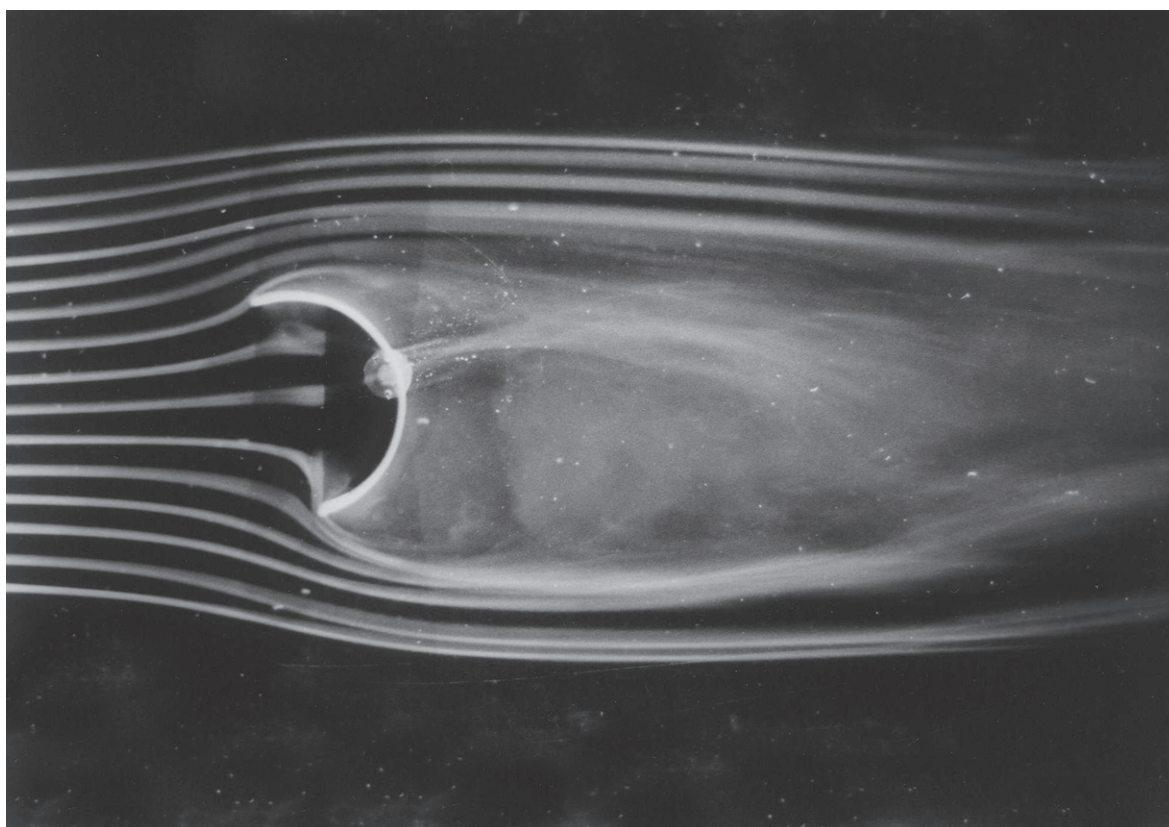
*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*



*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*

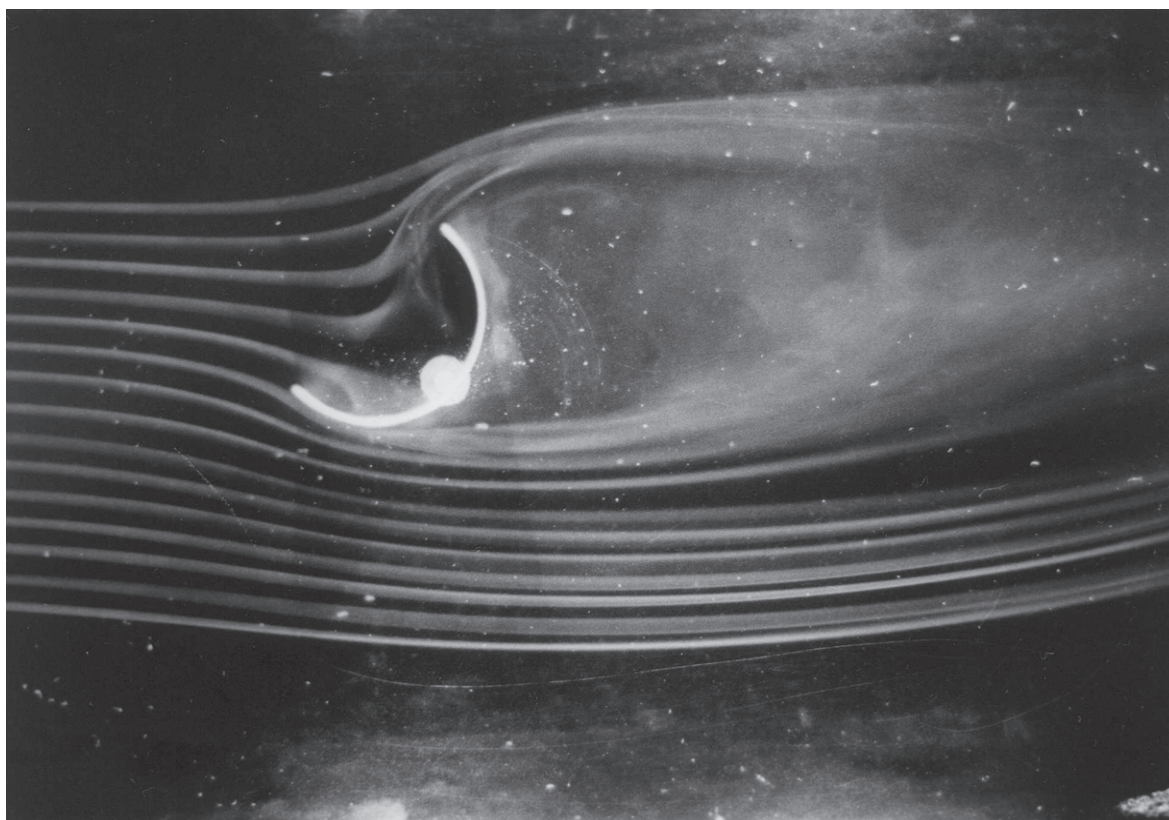


*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*

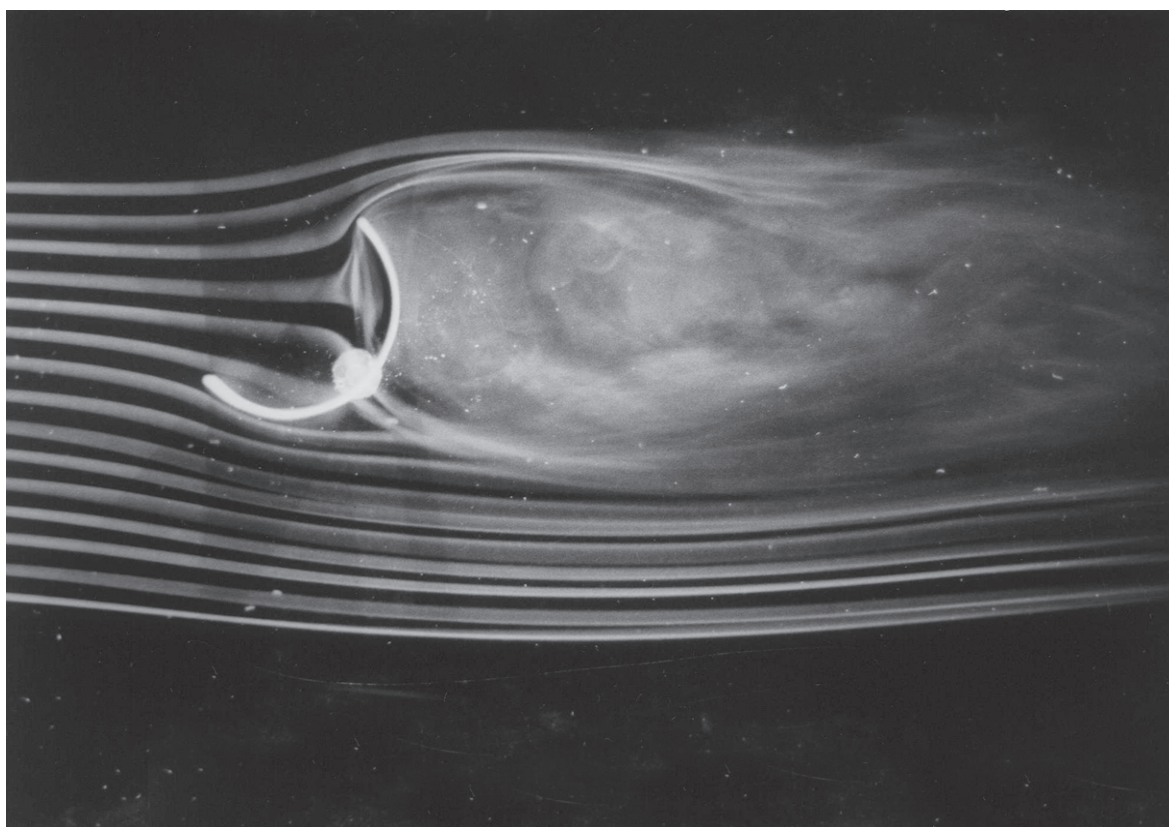


*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*





*Profil tvaru "polovina dutého válce" bez otvoru*

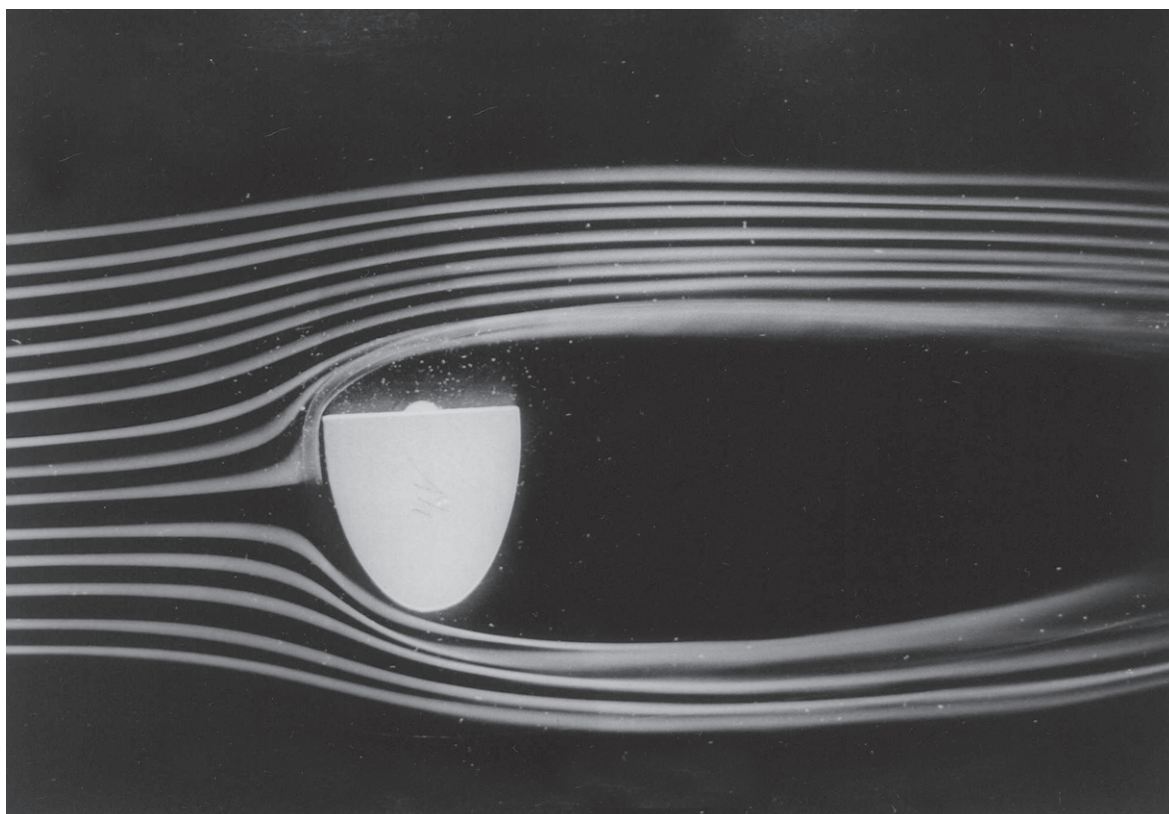


*Profil tvaru "polovina dutého válce" s otvorem*

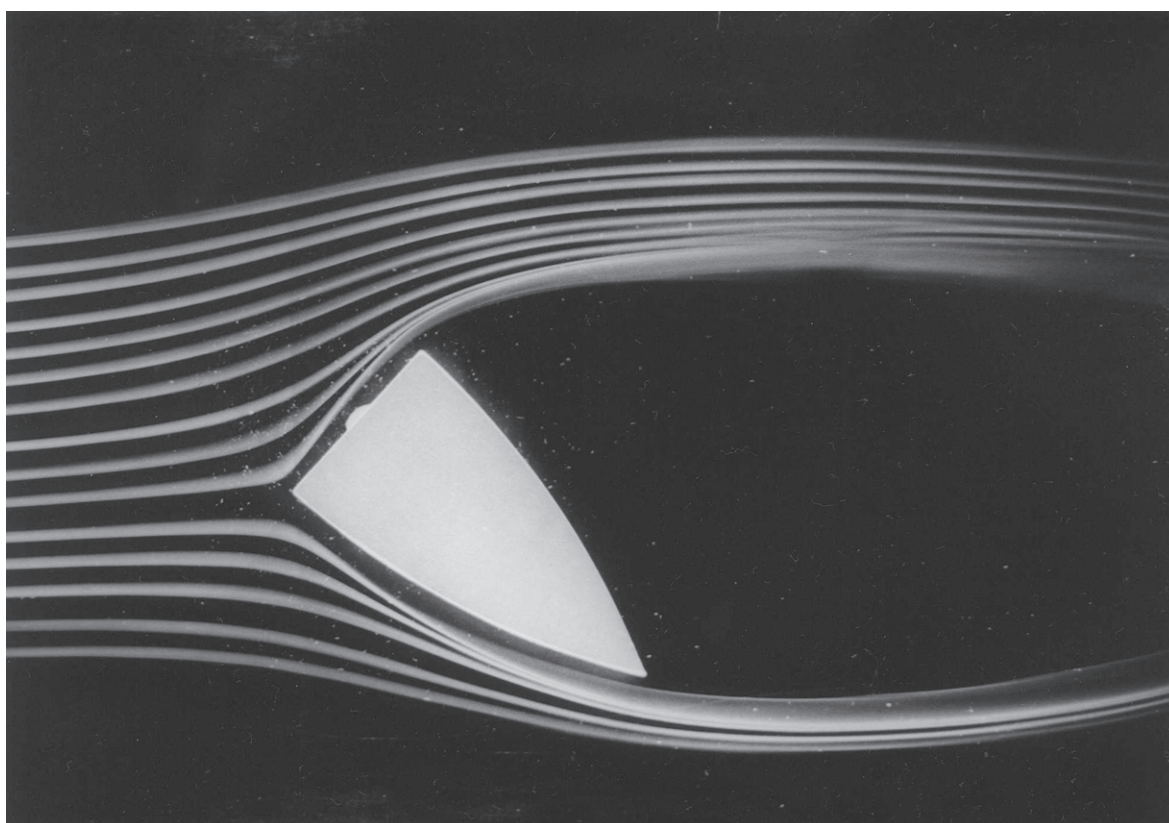


## **PŘÍLOHA VII**

### **PROFIL TVARU "U", "V"**



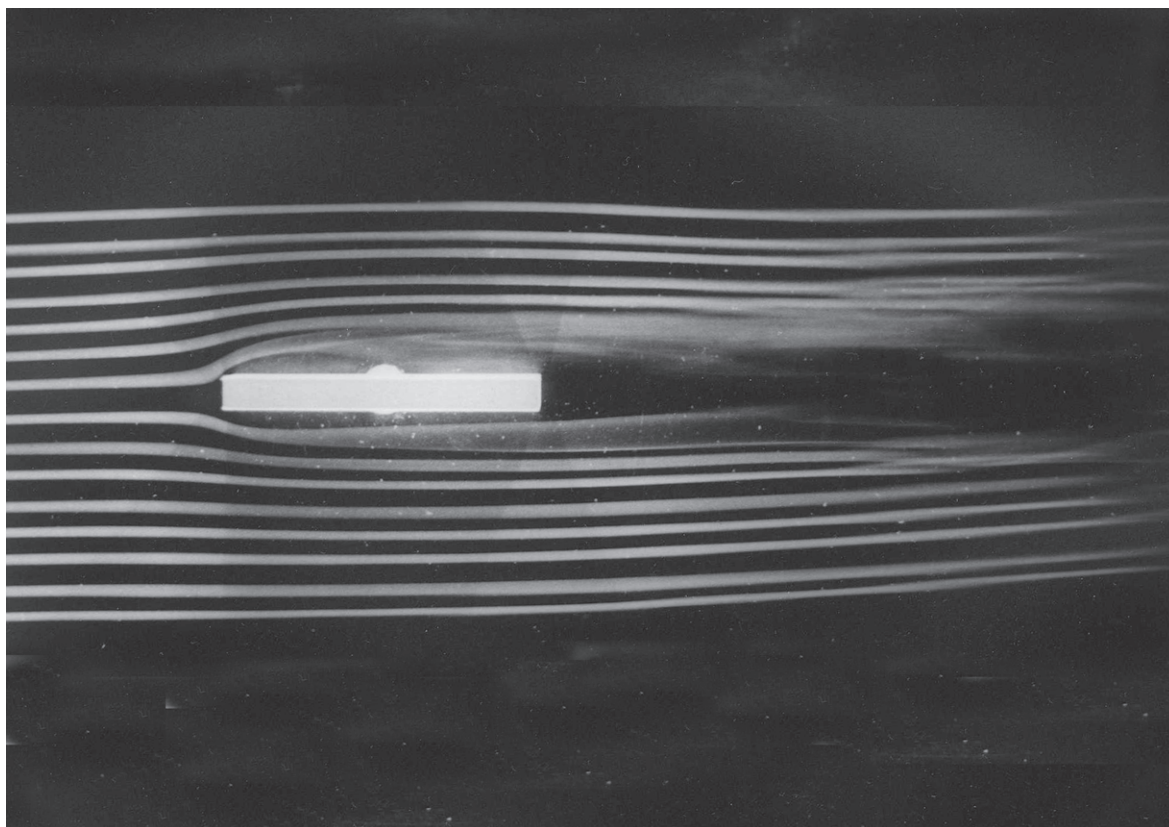
*Profil tvaru "U"*



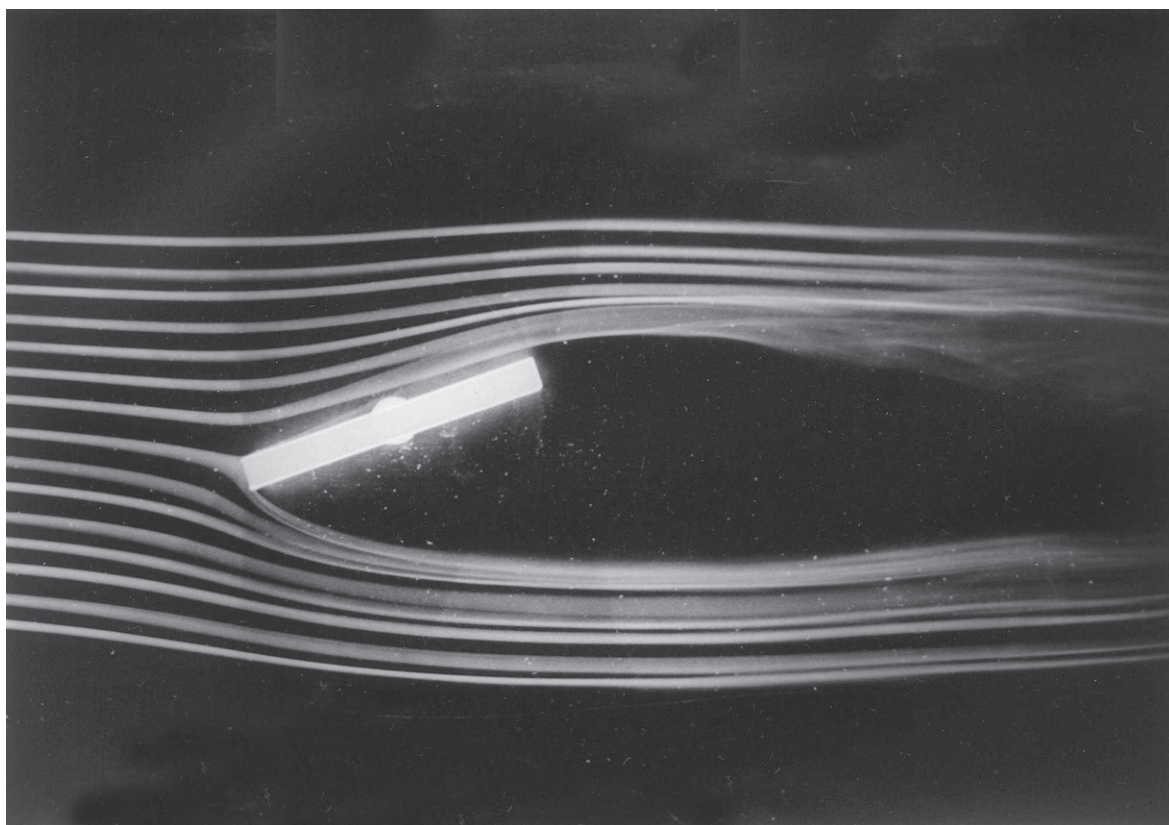
*Profil tvaru "V"*

## **PŘÍLOHA VIII**

### **DESKA**



*Deska rovnoběžná s proudem vzduchu*



*Deska s úhlem  $20^\circ$*